



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO PAULO**  
**Instituto de Ciências Ambientais, Químicas e Farmacêuticas**  
**Programa de Pós-Graduação em Análise Ambiental Integrada**



**MARCOS VINÍCIUS CORRÊA GARCIA**

**AVALIAÇÃO DO PARÂMETRO TRANSMISSIVIDADE DE  
LNAPLS PARA A GESTÃO DE ÁREAS CONTAMINADAS NO  
ESTADO DE SÃO PAULO**

**DIADEMA**

**2019**

**MARCOS VINÍCIUS CORRÊA GARCIA**

**AVALIAÇÃO DO PARÂMETRO TRANSMISSIVIDADE DE  
LNAPLS PARA A GESTÃO DE ÁREAS CONTAMINADAS NO  
ESTADO DE SÃO PAULO**

Dissertação apresentada, como exigência parcial para obtenção do título de Mestre em Ciências, ao Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu do Instituto de Ciências Ambientais, Químicas e Farmacêuticas da Universidade Federal de São Paulo – Campus Diadema

Orientador:

Dra. Juliana Gardenalli de Freitas

Dra. Mirian Chieko Shinzato

Coorientador:

Dr. Marco Aurélio Zequim Pedde

**DIADEMA  
2019**

Garcia, Marcos Vinícius Corrêa

Título: AVALIAÇÃO DO PARÂMETRO TRANSMISSIVIDADE DE LNAPLS  
PARA A GESTÃO DE ÁREAS CONTAMINADAS NO ESTADO DE SÃO PAULO/  
Marcos Vinícius Corrêa Garcia. — Diadema, 2019.

86 f.

Tese (Mestrado em Ciências – Programa de Pós-Graduação em  
Análise Ambiental Integrada) - Universidade Federal de São Paulo  
- Campus Diadema, 2019.

Orientador: Dra. Juliana Gardenalli de Freitas

Dra. Mirian Chieko Shinzato

Co-Orientador: Dr. Marco Aurélio Zequim Pede

1. Áreas Contaminadas. 2. Transmissividade de LNAPL 3Método  
Baildown 4. Mobilidade de contaminante. 5. LNAPL (Light Non Aqueous Phase  
Liquids). I. Título.

CDD 628.55



Serviço Público Federal  
Universidade Federal de São Paulo  
Pró – Reitoria de Pós-Graduação e Pesquisa

**ATA DE REUNIÃO DA COMISSÃO JULGADORA DA DEFESA  
DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

Aos onze dias do mês de março de dois mil e dezenove, reuniu-se na Sala de Videoconferência da Unidade José Alencar - Campus Diadema, Rua São Nicolau, 210, Subsolo – Centro - Diadema - SP, às 09:00 horas, a Comissão Julgadora para a **DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**, solicitada por **MARCOS VINICIUS CORRÊA GARCIA**, aluno do Programa de Pós-Graduação em **ANÁLISE AMBIENTAL INTEGRADA**, que apresentou a dissertação sob o título: **“Avaliação do parâmetro Transmissividade de LNAPLs, gestão de áreas Contaminadas no Estado de São Paulo”**. A referida Comissão esteve constituída pelos Professores Doutores:

- **Prof. Dr. Paulo César de Melo Negrão [CPF 158.431.758-20]**  
Doutor em Geociências.  
CLEAN Environment Brasil.

- **Profa. Dra. Sibele Ezaki [CPF 169.384.478-88]**  
Pesquisadora Científica.  
Universidade de São Paulo.

- **Prof. Dr. Everton de Oliveira [CPF 073.386.388-45]**  
Doutor em Hidrogeologia de Contaminação.  
HIDROPLAN – Hidrogeologia e Planejamento Ambiental Ltda.

A Presidente da Banca, Profa. Dra. Juliana Gardenalli de Freitas, iniciou a sessão, dando a palavra ao candidato, que dispôs de trinta a cinquenta minutos, no máximo, para expor sua dissertação. A seguir, deu a palavra aos Professores, para a arguição. Cada examinador dispõe de trinta minutos, no máximo, para arguição, bem como ao candidato, para resposta. Após o candidato ter respondido todas às arguições em tempo hábil, os membros da Banca Examinadora emitiram seus Pareceres:  
Profs. Drs.:

Paulo César de Melo Negrão

Aprovado

Sibele Ezaki

Sibele Ezaki Aprovada

Everton de Oliveira

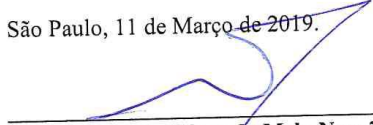
Aprovado

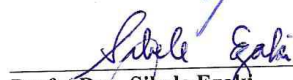



**Serviço Público Federal**  
**Universidade Federal de São Paulo**  
**Pró – Reitoria de Pós-Graduação e Pesquisa**

Em face dos referidos pareceres, a Comissão Julgadora considera o aluno(a) **MARCOS VINICIUS CORRÊA GARCIA** APROVADO (Aprovado/Reprovado) a receber o título de **MESTRE EM CIÊNCIAS** pela UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO PAULO. E, por estarem de acordo, assinam a presente ata.

São Paulo, 11 de Março de 2019.

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Paulo César de Melo Negrão

  
\_\_\_\_\_  
Profa. Dra. Sipele Ezaki

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Everton de Oliveira

  
\_\_\_\_\_  
Profa. Dra. Juliana Gádenalli de Freitas

*Dedico este trabalho à minha família, em especial ao meu querido avô Juverci (in memoriam).*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus e à minha família pelo apoio em todas as etapas da minha vida. À minha namorada Liza Junqueira pelo apoio, parceria, compreensão e paciência. Às minhas orientadoras Dra. Juliana Gardenalli de Freitas e Dra. Mirian Chieko Shinzato, que sempre se mostraram dispostas a me ajudar, buscando a melhor maneira de conduzirmos os trabalhos, entendendo e respeitando minhas limitações geográficas e agenda profissional. A orientação de vocês, contribuiu grandemente não somente com a dissertação, mas como um todo para meu crescimento profissional. Ao meu coorientador Dr. Marco Aurélio Zequim Pede, contribuição de informações para o desenvolvimento das atividades de campo.

Aos Professores do Programa de Pós-Graduação em Análise Ambiental Integrada, em especial aos do Laboratório Multidisciplinar em Mineralogia, Águas e Solos, Professora Dra. Sheila Aparecida Correia Furquim e Dr. Claudio Benedito Baptista Leite, pelo conhecimento repassado durante as disciplinas.

Aos amigos conquistados ao longo dessa etapa, Mariana, Arnaldo, Andressa, Auro, Rafaela, Douglas em especial a Larissa pela companhia e conversas durante as viagens para Diadema.

Ao amigo Marco Antônio, pelas viagens, conversas e parceria durante os trabalhos de campo. Aos amigos Roberto (Beto), Humberto (Betinho), Rodolpho e Fernanda (Fe) que cada um à sua maneira, contribuíram para que eu pudesse concluir essa etapa.

Aos colegas de laboratório, em especial a Ellen Leite, pela parceria, troca de experiências e auxílio nos trabalhos de campo e análises de laboratório.

Aos Drs. Everton de Oliveira e Miguel Alfaro Soto pelas valiosas observações durante a etapa de qualificação.

Ao CNPq, Processo 426953/2016-9 pelo auxílio financeiro.

A empresa Envimax Consultoria e Estratégia Ambiental através de Alexandre Oliveira, pelo empréstimo do equipamento fundamental para esse trabalho.

A Hidrosuprimentos através de Fabio Minzon, pelo fornecimento dos bailers utilizados nesse trabalho.

As empresas Venner Ambiental, DiaTech Ambiental e a Companhia Metropolitana de Habitação de São Paulo – COHAB São Paulo, pelo acesso as áreas para os estudos.

A todos vocês o meu muito obrigado!

O sucesso nada mais é que ir de fracasso em fracasso  
sem que se perca o entusiasmo (Winston Churchill)



## RESUMO

A industrialização e urbanização das grandes cidades contribuíram para o surgimento de áreas com passivos ambientais decorrentes dos processos industriais envolvendo produtos químicos, disposição inadequada de resíduos e acidentes. Frente a esse cenário, órgãos reguladores e empresas são desafiados a buscar novas abordagens de gestão das áreas contaminadas, demandando novos estudos para uma melhor compreensão dos danos ambientais. Nesse processo, avaliar o comportamento do contaminante em subsuperfície é de extrema importância para auxiliar nas tomadas de decisão de gestão de áreas contaminadas. Dentro desse contexto, o presente trabalho buscou avaliar a transmissividade do LNAPL (*Light Non-Aqueous Phase Liquids* – fase líquida não aquosa leve) em quatro áreas com características distintas de contaminação, distribuídas nos municípios de São Paulo, Ribeirão Pires e Jundiaí. Utilizou-se nesse estudo o método *Baildown*, descrito na norma ASTM E2856. Os resultados desses testes indicaram que os valores de transmissividade do LNAPL ( $T_n$ ) sofrem forte influência das variáveis ligadas às características litológicas, da instabilidade do nível d'água, do volume e das características físicas do LNAPL, das condições dos poços de monitoramento e da sua posição em relação a fase livre. Os resultados desse trabalho permitiram avaliar que o uso da transmissividade de LNAPL pode auxiliar na gestão de áreas contaminadas, tanto na etapa de investigação quanto na de remediação, mas devem ser tomados cuidados para a sua medição e interpretação dos resultados.

Palavras chave: áreas contaminadas, transmissividade do LNAPL, método *baildown*, mobilidade de contaminante, LNAPL (*Light Non Aqueous Phase Liquids*).

## ABSTRACT

The industrialization and urbanization of large cities contributed to the development of environmental liabilities, associated with industrial processes, inadequate waste disposal and accidents. Facing this scenario, regulators organs and companies are challenged to seek new ways to manage contaminated sites, demanding new studies for a better understanding environmental contamination. In this context, understanding contamination fate in the subsurface is of extreme importance to assist in the decision making for the contaminated sites management. This study aimed to evaluate LNAPL (*Light Non-Aqueous Phase Liquids*) transmissivity in four contaminated sites, distributed in the municipalities of São Paulo, Ribeirão Pires and Jundiaí. The Baildown method described in ASTM E2856 was used. The tests results indicated that LNAPL transmissivity is strong influenced by the the lithology, the water table instability, the LNAPL volume and the physical properties, the monitoring well conditions and their position related to the free phase. The results of this work showed that the use of the LNAPL transmissivity can help in the management of contaminated areas, both in the investigation phase and in the remediation phase. However, its measure and results interpretation must be performed with caution.

Key words: contaminated sites, LNAPL transmissivity, baildown method, contaminant mobility, LNAPL (Light Non Aqueous Phase Liquids).

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Comportamento da pressão da água ao longo do perfil do solo.....	23
Figura 2: Distribuição de LNAPL em função da saturação e propriedades do solo (adaptado de Lenhard e Parker, 1990). ....	27
Figura 3: Diagrama hipotético e simplificado de um sistema LNAPL/água em um meio poroso. ....	28
Figura 4: Exemplo de recuperação do poço de monitoramento durante o teste de Transmissividade. Nível da água em azul, nível de óleo em vermelho e superfície potenciométrica em verde.....	31
Figura 5: Esquema da Área 1 contendo a pluma de LNAPL e o perfil construtivo do poço de monitoramento.....	41
Figura 6: Esquema da Área 2 contendo a pluma de LNAPL e o perfil construtivo dos poços de monitoramentos. ....	42
Figura 7: Esquema da Área 3 contendo as plumas de LNAPL e o perfil construtivo dos poços de monitoramentos. ....	43
Figura 8: Croqui da Área 4 de estudo contendo as plumas de LNAPL e PM utilizado para o teste de Tn.....	44
Figura 9: Recuperação do LNAPL no poço da Área 1 dada pela variação de sua espessura em função do tempo de monitoramento.....	47
Figura 10: Recuperação da fase livre em PM 02 da Área 2 dada pela variação de sua espessura em função do tempo de monitoramento. ....	49
Figura 11: Recuperação da fase livre em PM 17 da Área 2 dada pela variação de sua espessura em função do tempo de monitoramento. ....	50
Figura 12: Recuperação da fase livre em PM 22 da Área 3 dada pela variação de sua espessura em função do tempo de monitoramento. ....	51
Figura 13: Recuperação da fase livre em PM SBF 03 da Área 3 dada pela variação de sua espessura em função do tempo de monitoramento. ....	52
Figura 14: Recuperação da fase livre em PM 07 da Área 3 dada pela variação de sua espessura em função do tempo de monitoramento. ....	53
Figura 15: Recuperação da fase livre PM 13 da Área 4 dada pela variação de sua espessura em função do tempo de monitoramento.....	54
Figura 16: Amostras de LNAPL encontradas Área 1.....	55
Figura 17: Aspecto das amostras de LNAPL coletadas no PM 02 na Área 2 no primeiro (alaranjado) e terceiro (amarelado) testes. ....	56
Figura 18: Amostras de LNAPL coletadas no PM 17 na área 2. ....	57

Figura 19: Amostra de LNAPL coletada no PM SBF 03 da Área 03.....	58
Figura 20: Amostra de LNAPL coletado no PM 07 na Área 03.....	59
Figura 21: Amostra de LNAPL coletada no PM 13 na Área 04.....	59
Figura 22: Ajustes de reta realizados para cálculo de Transmissividade.....	61
Figura 23: Ajustes de dados para cálculo da Transmissividade. ....	61
Figura 24: Esquema das principais variáveis/condições que influenciaram no cálculo da transmissividade ( $T_n$ ).....	63
Figura 25: comportamento de descarga em condições confinadas e livre respectivamente, exemplo API (2016). ....	70

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Valores típicos de altura da franja capilar de acordo com a textura do solo. ....	23
Tabela 2: Dados típicos de LNAPL. ....	26
Tabela 3: Registros de NO e NA durante os testes de transmissividade.....	40
Tabela 4: Descritivo geral dos testes. ....	46
Tabela 5: Resultados da caracterização dos produtos.....	55
Tabela 6: Resultados dos cálculos dos testes de transmissividade. ....	60
Tabela 7: Dados utilizados para avaliação da Tn no Teste 1 .....	77
Tabela 8: Dados utilizados para avaliação da Tn no Teste 2 Teste 3 e Teste 4.....	78
Tabela 9: Dados utilizados para avaliação da Tn no Teste 5. ....	80
Tabela 10: Dados utilizados para avaliação da Tn no PM 22 da Área 3 .....	81
Tabela 11: Dados utilizados para avaliação da Tn no PM SBF 03 da Área 3.....	82
Tabela 12: Dados utilizados para avaliação da Tn no PM 07 da Área 3 .....	84
Tabela 13: Dados utilizados para avaliação da Tn no PM 13 da Área 4 .....	85

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASTM - American Society for Testing and Materials  
API - American Petroleum Institute  
ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas  
B&R - Bouwer and Rice  
C&J - Cooper and Jacob  
CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo  
CONAMA - Conselho Nacional de Meio Ambiente  
DTP – Depth to product  
DTW - Depth to water  
G.E. – Gravidade Específica  
LNAPL - Light Non-Aqueous Phase Liquid  
MTBE - éter metil butilo terciário  
LAMAS - Laboratório Multidisciplinar de Águas e Solos  
NATEP - Laboratório do Núcleo de Apoio Técnico ao Ensino, Pesquisa e Extensão.  
Tn – Transmissividade do NAPL  
S<sub>o</sub> - Rebaixamento máximo induzido  
S<sub>n</sub> - Rebaixamento do LNAPL no tempo t  
J - Razão entre a mudança no rebaixamento para mudança de espessura durante o período de recuperação que está sendo analisado  
t - tempo de teste (t)  
R<sub>oi</sub> - Raio de influência (L)  
r<sub>w</sub> - Raio efetivo do poço (L)  
V<sub>t</sub> - Volume total efetivo de LNAPL no furo de sondagem  
V<sub>b</sub> - volume de LNAPL no pré-filtro  
V<sub>c</sub> - volume de LNAPL no poço  
b<sub>b</sub> - espessura de LNAPL no pré-filtro  
b<sub>n</sub> - espessura do LNAPL medido  
r<sub>c</sub> - raio do poço (L)  
r<sub>b</sub> - raio do furo de sondagem  
S<sub>yf</sub> - coeficiente de armazenamento do filtro

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>18</b>
<b>2. OBJETIVOS .....</b>	<b>21</b>
2.1. OBJETIVO GERAL.....	21
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	21
<b>3. EMBASAMENTO TEÓRICO .....</b>	<b>22</b>
3.1. ÁREAS CONTAMINADAS .....	22
3.2. MEIO SUBSUPERFICIAL .....	23
3.2.1 <i>Aquíferos</i> .....	25
3.3 LNAPL .....	26
3.4 COMPORTAMENTO DO LNAPL EM SUBSUPERFÍCIE.....	27
3.5 TRANSMISSIVIDADE DO LNAPL.....	30
3.5.1 <i>Métodos para avaliação da transmissividade</i> .....	32
3.5.2 <i>Considerações e limitações dos testes de Transmissividade do LNAPL (Tn)</i> ....	34
3.6 ESTUDOS DE CASO DE CONTAMINAÇÃO POR LNAPL .....	37
3.7 GEOLOGIA DO ESTADO DE SÃO PAULO .....	39
3.8 SOLOS DAS ÁREAS URBANAS .....	39
<b>4 MATERIAL E MÉTODOS.....</b>	<b>40</b>
4.1 TESTES DE TRANSMISSIVIDADE .....	40
4.2 ÁREAS DE ESTUDO.....	42
4.3 CARACTERIZAÇÃO DO LNAPL .....	46
<b>5 RESULTADOS .....</b>	<b>48</b>
5.1 TESTES DE TRANSMISSIVIDADE: OBSERVAÇÕES DE CAMPO E TENDÊNCIAS OBSERVADAS .....	50
5.1.1 <i>Área 1</i> .....	50
5.1.2 <i>Área 2</i> .....	51
□ <i>PM 02</i> .....	51
□ <i>PM 17</i> .....	52
5.1.3 <i>Área 3</i> .....	53
□ <i>PM SBF 03</i> .....	54
□ <i>PM 07</i> .....	55
5.1.4 <i>Área 4</i> .....	56
5.2 CARACTERIZAÇÃO DO LNAPL .....	57

5.3	QUANTIFICAÇÃO DA TRANSMISSIVIDADE DO NAPL .....	63
<b>6</b>	<b>DISCUSSÃO .....</b>	<b>65</b>
6.1	EFEITOS DOS NÍVEIS NÃO ESTÁTICOS PREVIAMENTE À REALIZAÇÃO DOS TESTES.....	66
6.2	EFEITOS DOS PROCEDIMENTOS DE CAMPO / OPERACIONAIS.....	68
6.3	PROPRIEDADES DETERMINANTES DE TN.....	70
6.4	CONSIDERAÇÕES SOBRE O CÁLCULO DE TN .....	71
<b>7</b>	<b>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....</b>	<b>74</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>76</b>
	<b>ANEXOS .....</b>	<b>80</b>
	ANEXO 1 - DADOS UTILIZADOS PARA AVALIAÇÃO DA TN NO TESTE 1 E GRÁFICO DO COMPORTAMENTO DE RECUPERAÇÃO DO POÇO DURANTE O TESTE. ....	80
	ANEXO 2 - DADOS UTILIZADOS PARA AVALIAÇÃO DA TN NO TESTE 2, TESTE 3 E TESTE 4 E GRÁFICOS DO COMPORTAMENTO DE RECUPERAÇÃO REALIZADOS NOS TESTES. ....	81
	ANEXO 3: DADOS UTILIZADOS PARA AVALIAÇÃO DA TN NO TESTE 5 E GRÁFICO DO COMPORTAMENTO DE RECUPERAÇÃO. ....	83
	ANEXO 4: DADOS UTILIZADOS PARA AVALIAÇÃO DA TN NO TESTE 6 E TESTE 7, E GRÁFICOS DO COMPORTAMENTO DE RECUPERAÇÃO NOS TESTES. ....	84
	ANEXO 5 - DADOS UTILIZADOS PARA AVALIAÇÃO DA TN NO TESTE 8 E TESTE 9, E GRÁFICOS DO COMPORTAMENTO DE RECUPERAÇÃO NOS TESTES. ....	85
	ANEXO 6: DADOS UTILIZADOS PARA AVALIAÇÃO DA TN NO TESTE 10 E TESTE 11, E GRÁFICOS DO COMPORTAMENTO DE RECUPERAÇÃO NOS TESTES. ....	87
	ANEXO 7: DADOS UTILIZADOS PARA AVALIAÇÃO DA TN NO TESTE 12 E GRÁFICO DO COMPORTAMENTO DE RECUPERAÇÃO. ....	88



## 1. INTRODUÇÃO

Historicamente, áreas contaminadas por fases líquidas não-aquosas menos densas que a água (*Light Non-Aqueous Phase Liquids* - LNAPL), como os combustíveis, representam um desafio significativo para a gestão e remediação de áreas contaminadas (ITCR, 2009). Os problemas mais comuns de contaminação de águas subterrâneas relacionadas ao LNAPL têm suas origens relacionadas à liberação de produtos petrolíferos ao meio ambiente, seja acidentalmente ou por seu uso inadequado (MAYER & HASSANIZADEH, 2005). Estes produtos são tipicamente misturas orgânicas multicomponentes com diferentes graus de solubilidade em água (NEWELL et al., 1995).

Um conceito mantido por muitos, a princípio, era que os vazamentos de LNAPL em meios porosos eram similares à adição de óleo a um tanque com água, onde por diferença de densidade, o petróleo flutuaria acima da água. A remediação se daria através do bombeamento do LNAPL, resultando num esgotamento quase completo do produto. Com base em décadas de pesquisa em produção de petróleo e física do solo, essa conceituação foi substituída por uma compreensão mais ponderada, incluindo a avaliação da mobilidade do contaminante para avaliar a recuperação de massa (API, 2003; SIMON, 2012).

Algumas propriedades são de fundamental importância para avaliação do potencial de mobilidade do LNAPL. Os parâmetros que controlam a distribuição e fluxo de LNAPL em subsuperfície incluem a molhabilidade, tensão interfacial, pressão capilar, permeabilidade relativa, densidade e viscosidade (NEWELL et al., 1995). Já a transferência de massa e partição entre fases estão relacionados à pressão de vapor, solubilidade e concentração, entre outros (MAYER & HASSANIZADEH, 2005). No meio físico as características geológicas, como porosidade e permeabilidade, influenciam na pressão capilar e, conseqüentemente, no transporte do NAPL (GROHMANN, 1960). Além disso, as heterogeneidades geológicas têm um impacto dominante sobre a migração e aprisionamento dos constituintes do NAPL (MAYER & HASSANIZADEH, 2005). Essas propriedades podem resultar numa distribuição heterogênea de LNAPL ao longo de uma área relativamente pequena, ou a presença transitória de LNAPL num poço (NEWELL et al., 1995). Desta forma, a relação entre as características do contaminante e do meio irão resultar em uma maior ou menor mobilidade do contaminante.

Um parâmetro que quantifica a mobilidade do LNAPL é a Transmissividade do LNAPL ( $T_n$ ) que, segundo Beckett & Huntley (2015) é a capacidade da massa de LNAPL mover-se no

meio poroso sob condições de saturação mista. A transmissividade de um LNAPL representa o volume de LNAPL que flui através de uma largura unitária do aquífero por unidade de tempo quando submetido a um gradiente hidráulico unitário (ASTM, 2013). Avaliar esse parâmetro tem grande importância do ponto de vista da recuperação do LNAPL por bombeamento, pois através da  $T_n$  é possível estimar-se a taxa de recuperação.

Segundo o último levantamento realizado pela CETESB no Estado de São Paulo, 72% das áreas relacionadas na lista de áreas Contaminadas e Reabilitadas são de postos de combustíveis (SÃO PAULO, 2016). Nessas áreas, a contaminação está relacionada aos LNAPLs, e a abordagem para a remediação predominante foi por bombeamento (SÃO PAULO, 2016). Considerando a baixa efetividade das técnicas de remediação por bombeamento, conhecer a transmissividade do LNAPL e a sua capacidade de indicar o potencial de recuperação da fase livre permite realizar uma análise crítica sobre a relação dos esforços demandados nessa técnica de remediação e a eficiência para a proteção ambiental e ou recuperação de aquíferos para usos benéficos (BECKETT et al., 1997). Sendo assim, a determinação da  $T_n$  é uma ferramenta de orientação nas decisões sobre a gestão de áreas contaminadas (BECKETT & HUNTLEY, 2015).

No Estado de São Paulo, a Decisão de Diretoria nº 103/2007/C/E, de 22 de junho de 2007, que dispunha sobre o procedimento para gerenciamento de áreas contaminadas, traz em seu Anexo 6.2 a orientação sobre as ações a serem tomadas quando identificada a presença de fase livre nas áreas. O documento indica que, a partir da constatação da fase livre, deverá ser realizada a remoção da mesma em um prazo máximo de 180 dias (SÃO PAULO, 2007). Ou seja, existe a orientação para a remoção da fase livre, porém, dependendo da mobilidade do LNAPL, acatar totalmente essa orientação em algumas áreas pode ser extremamente complexo e de custo elevado.

Considerando o grande número de áreas contaminadas por LNAPL no Estado de São Paulo, incluindo indústrias e postos de combustível, e as particularidades dos contaminantes, conhecer o comportamento dos mesmos em diferentes tipos de solos é de vital importância para uma gestão adequada dessas áreas. Isso é particularmente importante, visto que existe a orientação dos órgãos ambientais brasileiros pela priorização da remoção da fase livre (BRASIL, 2009), que muitas vezes é insatisfatória e, os custos ambientais para sanar o dano podem ser altos (BECKETT e HUNTLEY, 2015). Dentro desse cenário, a avaliação da transmissividade do LNAPL é uma importante ferramenta a ser considerada no diagnóstico e gestão de áreas impactadas por LNAPLs (BECKETT e HUNTLEY, 2015). No entanto, esse tipo de teste raramente é realizado nas áreas contaminadas no Estado de São Paulo, uma

vez que não se encontra como exigência ou orientação na Decisão da Diretoria nº 38 (SÃO PAULO, 2017), e a sua aplicabilidade nas condições brasileiras ainda não foi avaliada.

Buscando contribuir para melhor entendimento e auxiliar na gestão de áreas contaminadas por LNAPLs no Estado de São Paulo, este trabalho buscou avaliar a mobilidade dessa classe de contaminantes, através de testes de Transmissividade de NAPL utilizando o método *Baildown*, descrito na norma ASTM E2856 (ASTM, 2013).

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. Objetivo Geral**

Avaliar o método de quantificação da transmissividade de LNAPL considerando as condições ambientais e o grau de contaminação, a fim de nortear decisões sobre a aplicação desse parâmetro na gestão de áreas contaminadas.

### **2.2. Objetivos Específicos**

- Quantificar a Tn em diferentes áreas no Estado de São Paulo com condições distintas;
- Analisar a relação entre os diferentes tipos de LNAPL (gasolina, óleo de motor e óleo diesel) e a Tn;
- Avaliar a relação entre diferentes litologias e a Tn;
- Identificar as condições das áreas que dificultam ou limitam a aplicação da metodologia testada;
- Discutir o uso do parâmetro transmissividade de NAPL no gerenciamento de áreas com LNAPL e as suas limitações.

### **3. EMBASAMENTO TEÓRICO**

#### **3.1. Áreas contaminadas**

Segundo o Ministério do Meio Ambiente (BRASIL, 2018) as áreas contaminadas correspondem a locais cuja contaminação é oriunda da inserção, acidental ou não, de qualquer substância ou resíduo que comprovadamente altere negativamente as condições naturais do local. Os poluentes nesses locais podem estar concentrados em diferentes compartimentos do ambiente subterrâneo, como nas zonas saturadas e não saturadas, podendo estar acumulados no solo, sedimentos, rochas, aterros, água subterrânea, além de estruturas das edificações como, paredes e pisos (SÃO PAULO, 2016).

Um aspecto importante envolvendo áreas contaminadas refere-se aos passivos ambientais provenientes da desativação e do abandono de instalações industriais e da disposição inadequada de resíduos. Identificada a contaminação, existe o desafio de fazer o gerenciamento dessas áreas, buscando equacionar as melhores soluções para a tratativa e remediação da contaminação (TEIXEIRA et al., 2016).

Nas áreas contaminadas, onde os limites de concentração dos poluentes ultrapassam os valores máximos estabelecidos pela legislação, a reutilização ou reinserção urbana somente ocorrerá após a realização de um processo de avaliação e remediação (GÜNTHER, 2006). O uso dessas áreas sem essa ação, gera riscos ao meio ambiente e à saúde da população, além de afetar a qualidade de vida urbana (HABERMANN & GOUVEIA, 2014).

A gestão de áreas contaminadas teve início em países desenvolvidos na década de 70, onde as indústrias poluidoras tiveram que buscar adequações e passaram a demandar equipamentos, produtos, sistemas e processos que tratassem das contaminações presentes em suas áreas, para cumprir as obrigações impostas por políticas governamentais (TEIXEIRA et al., 2016). Em países em desenvolvimento como o Brasil, o gerenciamento das áreas contaminadas iniciou-se um pouco mais tarde (DE MORAES et al., 2014), tendo como um dos primeiros registros emblemáticos de área contaminada no Brasil a contaminação por ácido sulfúrico, ácido clorídrico e hexaclorociclohexano, provenientes do processo produtivo nas Indústrias Reunidas Matarazzo em São Caetano do Sul, Estado de São Paulo (TEIXEIRA et al., 2016).

Conceitualmente, a gestão de áreas contaminadas pode ser definida como um conjunto de medidas que se fazem necessárias para conhecer as características das áreas contaminadas, estudar a melhor maneira de intervir para mitigar ou eliminar os efeitos danosos ao homem e ao meio ambiente (SÃO PAULO, 2016).

Apesar da publicação da Resolução CONAMA 420/09, que fixa obrigações a nível nacional sobre a qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e gerenciamento de áreas contaminadas, pouco se avançou efetivamente no Brasil frente a essas questões. Muitos setores industriais (privados e públicos) ainda assumem uma postura pouco proativa a fim de identificar e remediar as áreas contaminadas decorrentes do desenvolvimento de suas atividades, e programas de investigação são seguidos somente após demanda de órgãos ambientais (DE MORAES et al., 2014). Somado a esse cenário reativo, poucas empresas prestadoras de serviços ambientais promovem poucos investimentos em capital intelectual, o que torna as ações de investigação mal planejadas e executadas, resultando em sistemas de remediação ineficientes, que muitas vezes são insuficientes e geram elevados custos financeiros adicionais (DE MORAES et al., 2014).

### **3.2. Meio subsuperficial**

O meio subsuperficial é classificado em duas zonas de acordo com a proporção relativa do espaço poroso ocupado pela água, sendo classificadas como zonas saturada e não saturada.

Conforme Feitosa et al. (2008) a zona saturada situa-se abaixo da superfície freática e todos os poros estão preenchidos por água. Na superfície freática, a água encontra-se submetida à pressão atmosférica, sendo uma superfície real cuja pressão de referência é nula. Para que ocorra infiltração até esse ponto é necessário sobrepor a força de adesão na zona não saturada (FREEZE & CHERRY, 1979).

A zona não saturada, também denominada zona vadosa, encontra-se localizada entre a superfície freática (nível freático) e a superfície do terreno. A saturação dos poros se dá de maneira parcial por gases e água (FREEZE & CHERRY, 1979). A zona vadosa é subdividida em três zonas: capilar, intermediária e água do solo.

A zona capilar (ou franja capilar) ocorre entre a superfície freática até o limite de ascensão capilar da água. Fatores como distribuição de tamanho dos poros e homogeneidade do meio são responsáveis pela delimitação de sua espessura, e a sua base apresenta uma maior saturação dos poros quando confrontada com seu topo, que apresenta um limite superior irregular (FEITOSA et al., 2008). Sua espessura está relacionada a altura máxima de ascensão capilar, que depende diretamente do diâmetro efetivo dos grãos. Em meios onde predominam cascalhos finos, por exemplo, a ascensão capilar é próxima a 1 cm, enquanto que partículas do tamanho de silte permitem uma ascensão de até 2 m (FEITOSA et al., 2008). Perloff & Baron (1991) apresentam os valores típicos de altura capilar segundo a textura do solo (Tabela1).

Tabela 1: Valores típicos de altura da franja capilar de acordo com a textura do solo.

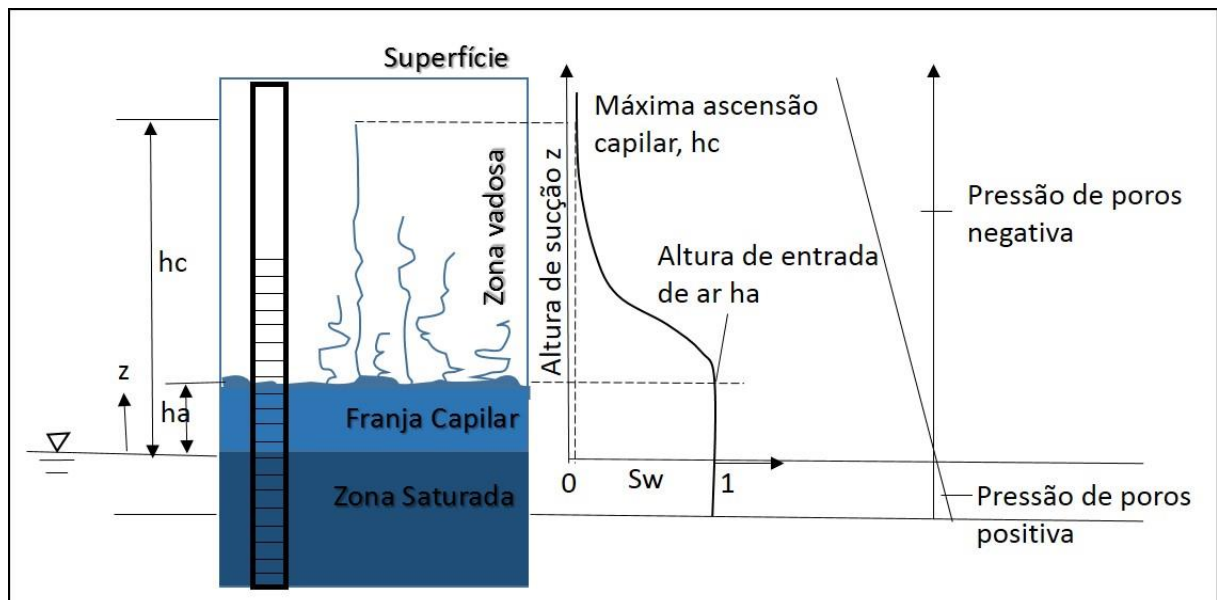
Textura de Solo	Altura franja capilar (cm)
Areia grossa	2-5
Areia	12-35
Areia fina	35-70
Silte	70-150
Argila	200-400 e mais

Fonte: Perloff & Baron (1991).

Acima da zona capilar encontra-se a parcela denominada zona intermediária, que se limita ao alcance das raízes das plantas. Nessa área, a umidade é proveniente de águas capilares isoladas. Por fim, a zona de água do solo situa-se entre os limites dos sistemas radiculares da vegetação e a superfície do terreno (FEITOSA et al., 2008).

Um modo de entender a relação entre a água contida no solo e a pressão capilar é através da curva de saturação, onde pode ser visualizado o grau de saturação do fluido molhante e a pressão capilar, resultante da diferença de pressão entre os fluídos no meio; esta métrica é dependente da distribuição do tamanho dos grãos no meio poroso (CHARBENEAU, 1992). Essa relação pode ser vista na Figura 1, que ilustra o grau de saturação e a pressão capilar, representadas pela curva de saturação.

Figura 1: Comportamento da pressão da água ao longo do perfil do solo.



Fonte: Adaptado de Lu & Likos (2004).

### 3.2.1 Aquíferos

Aquíferos são formações geológicas que apresentam porosidade interconectada e permeabilidade suficiente para que possa ocorrer o armazenamento e a transmissão de água, sob gradientes hidráulicos naturais, ou seja, material geológico capaz de servir de reservatório e de transmissor da água armazenada. A constituição geológica do aquífero é o fator determinante da sua condutividade hidráulica e qualidade como reservatório (CLEARY, 2007).

Os aquíferos podem ser classificados tanto por sua porosidade quanto por sua pressão. Quanto à porosidade, os aquíferos podem ser classificados em porosos ou sedimentares, fraturados e cársticos (MANZIONE, 2015).

Os aquíferos porosos ou sedimentares são aqueles provenientes de rochas sedimentares consolidadas, sedimentos inconsolidados ou solos arenosos, e apresentam como característica a circulação da água nos poros formados entre os grãos (areia, silte e argila) (FEITOSA et al., 2008).

O aquífero fraturado ou fissural tem sua origem nas rochas cristalinas (ígneas ou metamórficas) duras e maciças, cuja circulação da água se dá em função da abertura de “caminhos” provenientes de estruturas tectônicas como falhas, fraturas e fendas, encontradas nas rochas (MANZONI, 2015).

O aquífero cárstico (*Karst*) se forma em rochas calcáreas ou carbonáticas e, assim como nos aquíferos fraturados, a circulação da água se faz nas fraturas e outras discontinuidades (diáclases) da rocha, porém o processo de formação desses caminhos ocorre em decorrência da dissolução do carbonato pela água (FEITOSA et al., 2008).

Em relação à pressão, os aquíferos são classificados em confinados ou não confinados, em função da existência ou não de um lençol freático ou superfície freática. No caso dos aquíferos não confinados, a formação geológica permeável é aflorante e sua superfície superior encontra-se em equilíbrio com a pressão atmosférica. Nessa classificação incluem-se, ainda, os aquíferos suspensos, que se caracterizam por apresentar uma extensão limitada e podem ser responsáveis por nascentes surgentes temporárias (FITTS, 2014).

Os aquíferos confinados são formações geológicas envoltas em suas extremidades por materiais relativamente impermeáveis. Essa conformação geológica atribui a esses aquíferos pressões superiores à pressão atmosférica. Esse confinamento pelos materiais pouco permeáveis impede o movimento ascendente e descendente da água. Existem também os aquíferos semiconfinados, que se diferenciam dos confinados pelo tipo de camada que os envolvem, cuja permeabilidade é inferior à do aquífero (FREEZE & CHERRY, 1979).



### 3.3 LNAPL

O termo NAPL (*non-aqueous phase liquids*) é aplicado a um composto orgânico ou a uma mistura de compostos orgânicos, líquido e imiscível em água. De acordo com a densidade, um NAPL pode ser classificado em DNAPL, se for mais denso que a água, ou LNAPL, se for menos denso que a água, como gasolina, óleo diesel e óleo de aquecimento (SIMON, 2012).

Os LNAPLs mais comumente encontrados nas áreas contaminadas em postos de combustível são gasolina, diesel, óleos lubrificantes e etanol. A gasolina, segundo Agência Nacional do Petróleo (ANP, 2016) é uma mistura complexa de hidrocarbonetos relativamente voláteis que variam de 5 a 12 carbonos. É obtida através de diferentes processos, podendo ser através da destilação fracionada do petróleo em refinarias, assim como por processos químicos complexos (ANP, 2016).

No óleo diesel, os hidrocarbonetos são compostos de cadeias de 8 a 16 carbonos, tendo ainda em sua composição nitrogênio, enxofre e oxigênio. Seu uso está ligado a motores de combustão interna e ignição por compressão (ANP, 2017). O etanol, diferentemente dos outros combustíveis encontrados nas contaminações de postos, tem sua origem através da fermentação de açúcares, cuja fórmula molecular é  $C_2H_6O$ . Seu uso se dá através de duas formas de utilização do produto, como componente de mistura na formação da gasolina comum (etanol anidro) e como combustível acabado (etanol hidratado) (ANP a, 2016). Os óleos lubrificantes possuem como componente principal o óleo básico, que pode ser de origem mineral (primeiro refino ou rerrefinado), sintética ou vegetal. As características conferidas aos óleos lubrificantes provém dos aditivos adicionados em sua composição (ANP a, 2016).

Além da densidade e composição, outras propriedades importantes dos LNAPLs são a viscosidade e a tensão interfacial. A viscosidade é a propriedade relacionada à resistência de um fluido ao movimento relativo e à deformação por cisalhamento durante o fluxo (FREEZE & CHERRY, 1979). É dependente da temperatura, sendo inversamente proporcional a mesma. Quanto menor a viscosidade, menos energia é necessária para um fluido fluir em um meio poroso (NEWELL et al., 1995).

A Tabela 2 fornece valores típicos de LNAPLs utilizados na indústria e transporte em território nacional.

Tabela 2: Dados típicos de LNAPL.

Produto	Densidade a 20 °C	Viscosidade (mm <sup>2</sup> /s) a 40°C	Nº FISPQ - Data
Gasolina	0,73 – 0,77	*	BR0051 - 09/04/2018
Diesel S10	0,815 – 0,853	2,0–4,5	BR0134 - 05/04/2018
Diesel s 500	0,820-0,865	2,5–5,5	BR0109 - 28/04/2017
Querosene	0,804	1 – 2,4	BR0030 - 09/04/2018

Fonte: FISPQ dos produtos.

\*Não informado na FISPQ

Quando existem dois fluidos imiscíveis, como NAPL-ar ou NAPL-água, forma-se uma interface entre eles. Nessa interface atua uma tensão, chamada de tensão interfacial. A tensão interfacial é causada pela diferença entre a atração das moléculas no interior dos diferentes fluidos imiscíveis e na superfície de contato (BEAR, 1972). Essa diferença em energia gera uma tensão tangencial a interface entre os fluidos. A tensão interfacial é afetada por mudanças no pH, presença de gases dissolvidos e surfactantes (NEWELL et al., 1995).

A tensão interfacial é o principal fator responsável pelo controle da molhabilidade, que é a tendência de um fluido de se espalhar ou aderir a uma superfície sólida na presença de outro fluido imiscível. Em um sistema multifásico o líquido molhante irá preferencialmente revestir (molhar) as superfícies sólidas e tende a ocupar espaços de poros menores, enquanto o fluido não molhante será geralmente limitado aos maiores poros. Em geral, o NAPL é o fluido não molhante em relação à água (NEWELL et al., 1995). A diferença de pressão através da interface entre as fases molhante e não molhante é denominada de pressão capilar (YOUNG, 1805).

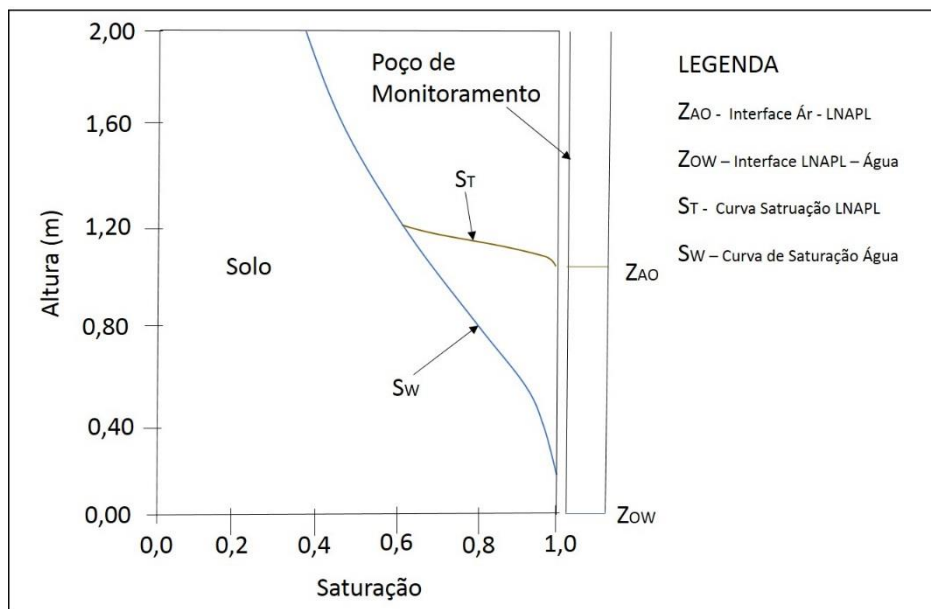
### 3.4 Comportamento do LNAPL em subsuperfície

Ao ser lançado na subsuperfície o LNAPL tende a migrar através da zona não saturada em fluxo descendente devido à força da gravidade, sendo que uma fração deste poderá ficar retida por forças capilares nos poros do solo, chamada de fase residual (PARKER & ISLAM, 2000). A saturação de NAPL que pode ficar retida como fase residual depende de vários fatores, como molhabilidade, pressão capilar e litologia do meio (NEWELL et al., 1995; CHARBENEAU et al., 2000).

Enquanto houver aporte suficiente, o LNAPL continuará migrando até encontrar o topo da zona saturada. Quando atinge a franja capilar, devido à sua menor densidade, o LNAPL passa a migrar lateralmente como uma camada contínua e móvel, chamada de fase livre (NEWELL et al., 1995). A distribuição do LNAPL resultante em função da profundidade (Figura 2)

depende das propriedades do solo (como tamanho do grão e porosidade), das propriedades do líquido de fase não aquosa (LNAPL) (como viscosidade), assim como do volume de LNAPL liberado para a subsuperfície. (API, 2003).

Figura 2: Distribuição de LNAPL em função da saturação e propriedades do solo.



Fonte: adaptado de Lenhard e Parker, 1990.

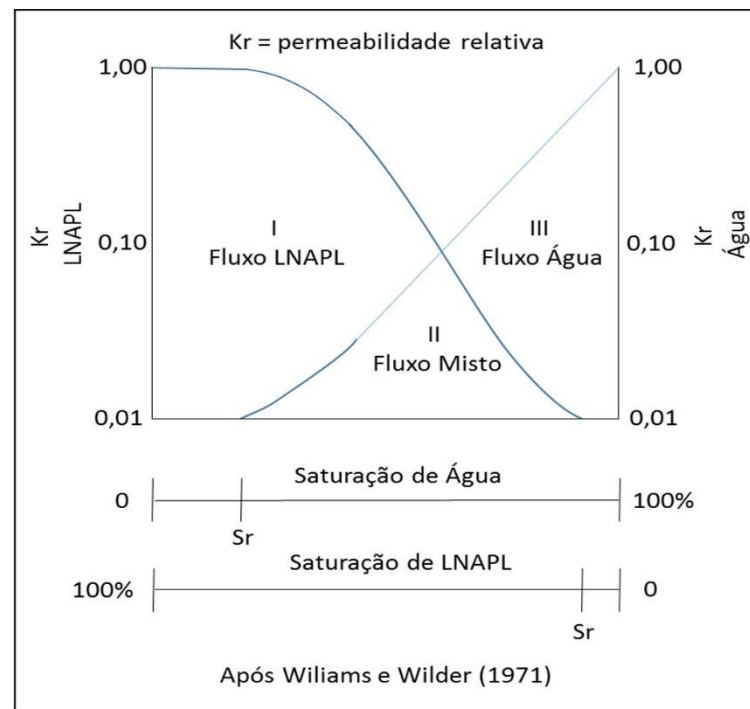
No lençol freático, com o acúmulo do LNAPL, este tende a migrar horizontalmente de acordo com a inclinação do nível d'água. Os constituintes ou produtos químicos que compõem o LNAPL podem ser removidos ao longo do tempo por vários mecanismos, tais como sorção, volatilização e dissolução (API, 2003). A dissolução pode gerar alteração da qualidade das águas, pois frações dos compostos orgânicos se dissolvem, contaminando esse recurso (API, 2003). A relativamente baixa solubilidade dos LNAPLs faz com que estes se tornem fonte de contaminação para as águas subterrâneas por longos períodos (API, 2003). Por outro lado, um benefício da sua baixa solubilidade é que a partição para o meio ambiente geralmente é pequena e os processos naturais muitas vezes atenuam os contaminantes de interesse em pequenas distâncias a partir da fonte (API, 2003).

Um dos impactos associados ao contato da fase livre com a zona saturada está relacionado à limitação da sua mobilidade e, conseqüentemente, da possibilidade de sua recuperação por bombeamento, em função do compartilhamento dos poros pela água e pelo LNAPL (API, 2003; MAYER & HASSANIZADEH, 2005). Quando há a presença simultânea de duas fases no meio poroso, ocorre competição pelo espaço no poro. Assim, a permeabilidade de cada fase é variável em função das saturações das fases aquosas (fração do volume total dos poros ocupados por um fluido).

Assim, a mobilidade dos LNAPLs em contato com as águas subterrâneas pode ser descrita através das curvas de permeabilidade relativa ( $k_r$ ) do próprio LNAPL e da água, sendo  $k_r$  a razão entre a permeabilidade de uma fase com uma determinada saturação e a permeabilidade intrínseca do meio ( $k$ ). Assim, a permeabilidade relativa indica a capacidade do meio poroso de permitir o fluxo de dois ou mais fluidos (NEWELL et al., 1995; WINEGARDNER & TESTA, 2000; MAYER & HASSANIZADEH, 2013).

De acordo com Newell et al. (1995) essa propriedade depende da saturação dos fluidos presentes, cujo comportamento hipotético e simplificado de um sistema LNAPL/água em um meio poroso encontra-se representado na Figura 3. Através da análise dessa figura é possível entender a interferência de um fluido no fluxo do outro, de acordo com sua saturação.

Figura 3: Diagrama hipotético e simplificado de um sistema LNAPL/água em um meio poroso.



Fonte: Adaptado de Newell et al. (1995).

Os valores mínimos de saturação de um fluido devem ser alcançados para que a sua permeabilidade seja diferente de zero (NEWELL et al., 1995). Segundo os autores, as saturações mínimas para os fluidos recebem os nomes de saturação irreduzível ( $S_{ir}$ ) para os fluidos molhantes e saturação residual ( $S_r$ ) para o fluido não molhante.

A oscilação do nível de água pode interromper o fluxo do LNAPL pelo aumento da saturação de água e consequente redução na  $k_r$  do NAPL, retendo-o nos poros como fase residual (API, 2003). A fase residual também é formada pela própria remediação da fase livre por bombeamento, que causa redução na saturação de NAPL e a descontinuidade do NAPL nos

poros. A saturação residual de LNAPL representa uma fonte potencial para a contaminação contínua das águas subterrâneas, de difícil remoção por não ter mobilidade.

Conforme a Figura 3, as curvas de permeabilidade relativa podem ser utilizadas para descrever diferentes regimes de fluxo multifásico. Esses regimes podem ser divididos em três grupos, de acordo com a saturação do LNAPL e da água. Na Zona 1 (Fluxo de LNAPL), o LNAPL apresenta alta saturação, sendo uma fase móvel e contínua; a água por sua vez, apresenta saturação irreduzível. Essa condição geralmente é encontrada em locais com o acúmulo de grandes quantidades de LNAPL.

A Zona 2 (Fluxo Misto), como o nome indica, é a área onde ocorre o fluxo misto, ou seja, existe a ocorrência de água e LNAPL como fases contínuas, porém não ocupando os mesmos poros. Nesse caso, a permeabilidade relativa de cada fluido é influenciada pela saturação do outro. Esse cenário ocorre onde não há tanto acúmulo de LNAPL. A Zona 3 (Fluxo de Água) ocorre em áreas onde o LNAPL encontra-se com saturação residual, em poros isolados, e o fluxo é predominantemente o da água subterrânea.

As características do meio e do LNAPL controlam o transporte do produto tanto em escala de poros como na escala de campo. Porém, quando se busca analisar a distribuição em escala de campo, o entendimento torna-se mais complexo devido a fatores como histórico de liberação do LNAPL em subsuperfície, volume vazado, área de infiltração e a heterogeneidade subterrânea (permeabilidade e granulometria; litologia e estratigrafia e a presença de fraturas ou caminhos preferenciais causados por raízes). Porém, para que sejam melhor discutidos os modelos conceituais em escala de campo, princípios de escala de poro são necessários (NEWELL et al., 1995).

### **3.5 Transmissividade do LNAPL**

Transmissividade é um termo hidrogeológico que significa a taxa na qual a água (ou outro líquido) é transmitida através de uma largura unitária do aquífero sob um gradiente hidráulico unitário (LOHMAN, 1972).

A transmissividade de LNAPL ( $T_n$ ), segundo API (2016), pode ser descrita como a medida da mobilidade lateral da fase livre do hidrocarboneto. É uma medida do volume de NAPL que flui por uma faixa do aquífero por tempo, para um rebaixamento unitário para um do LNAPL (ASTM, 2012); e representa a capacidade da formação de transmitir um volume de óleo nas condições predominantes no momento do teste (HUNTLEY & BECKETT, 2015). Segundo

Simon (2012), depende das propriedades dos fluidos e dos aquíferos, bem como forças gravitacionais controladas pelo gradiente hidráulico.

Ela fornece uma métrica de taxa de recuperação que é comparável entre locais, independentemente da geologia ou do tipo de produto, ou seja, o valor discutido será sempre em função do valor de  $T_n$ . É uma medida substancialmente melhorada sobre a espessura aparente de NAPL aferida nos poços (HAWTHORNE & KIRKMAN, 2011). A espessura aparente de NAPL calibrada em poços é uma métrica inadequada para se avaliar a taxa de recuperação de LNAPLs, visto que a mesma espessura pode exibir diferentes volumes recuperáveis de NAPL em diferentes tipos de solos com diferentes distribuições de tamanho de grão. A transmissividade do LNAPL, por outro lado, é uma métrica resumida que incorpora propriedades físicas, saturação e permeabilidade relativa de NAPL, bem como parâmetros de aquíferos e, como resultado, correlaciona-se muito bem com a capacidade de recuperação do LNAPL (HAWTHORNE & KIRKMAN, 2011). Dessa forma, a taxa de recuperação do LNAPL não deve ser baseada na espessura medida em um poço, mas sim na transmissividade do LNAPL, que é baseada nas mesmas equações que definem a transmissividade da água (HAWTHORNE & KIRKMAN, 2011).

Assim sendo, a transmissividade do LNAPL, além de ser uma métrica para atendimento de padrões de legislação, pode ser utilizada para planejamento de testes piloto de recuperação de LNAPL e otimização de soluções de remediação, sendo uma importante ferramenta para tomada de decisões (ITRC, 2018). A transmissividade também pode ser utilizada para avaliar se a perda de massa de contaminante por atenuação natural será mais ou menos eficiente que sua remoção por bombeamento, visto que em condições de mobilidade reduzida, a opção pela atenuação natural torna-se uma opção (HUNTLEY & BECKETT, 2002).

A transmissividade de LNAPL é, portanto, um parâmetro potencialmente útil mas complexo, por considerar a capacidade da maior parte do LNAPL mover-se através de meios porosos sob condições mistas de saturação (HUNTLEY & BECKETT, 2002). Essa complexidade está relacionada ao fato da transmissividade de LNAPL não ser uma constante da formação (ITRC, 2018). Ela pode variar de acordo com as condições de teste, tempo e mudanças nas condições piezométricas, sendo que para se calcular a  $T_n$ , a espessura do LNAPL no aquífero deve estimada ao longo do tempo (SIMON, 2012).

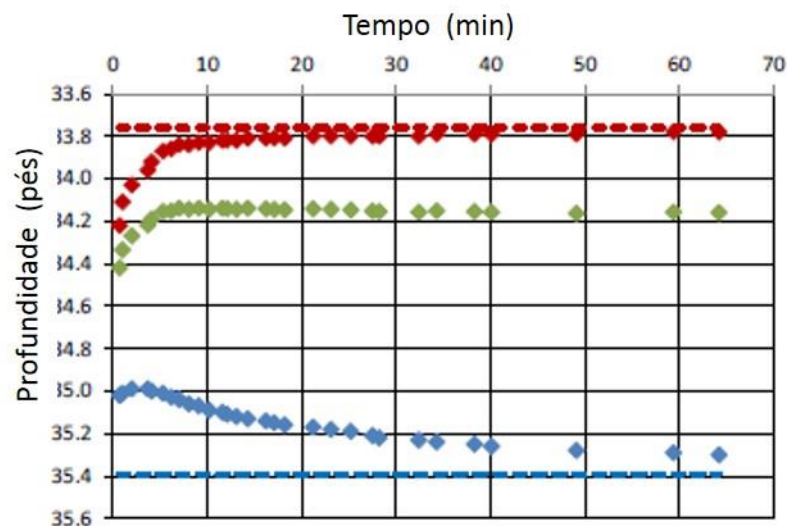
### *3.5.1 Métodos para avaliação da transmissividade*

Existem vários modelos matemáticos utilizados para calcular a Transmissividade de LNAPL, entre eles, pode-se citar a Lei de Darcy. Entretanto, faz-se necessária a correção dos valores

de condutividade hidráulica da água para se considerar as propriedades do LNAPL. Apesar deste ser um método utilizado para se estimar a  $T_n$ , os valores calculados podem apresentar divergência daqueles medidos em campo (ITCR, 2018).

A norma E2856-13 da ASTM (2013) apresenta metodologias para se estimar a  $T_n$ . Uma delas é o teste *Baildown*, onde o volume de NAPL no poço e pré-filtro é removido, causando uma diferença de carga hidráulica. Após essa perturbação, o nível dos fluidos no poço é monitorado ao longo do tempo (HUNTLEY, 1999). Durante esse teste, é esperado que o nível de água (NA) diminua e o de óleo (NO) aumente, gerando curvas opostas, ocasionando um aumento da fase livre durante o período monitorado, até que os níveis estejam próximos aos das condições iniciais (pré *baildown*). Esse comportamento pode ser visualizado nas curvas dos testes apresentado como exemplo na Figura 4.

Figura 4: Exemplo de recuperação do poço de monitoramento durante o teste de Transmissividade. Nível da água em azul, nível de óleo em vermelho e superfície potenciométrica em verde.



Fonte: API (2016).

A análise dos dados obtidos pode ser feita pelos modelos de Bouwer & Rice (1976) e de Cooper & Jacob (1946). O método de Bouwer & Rice (1976) utiliza um modelo linear que relaciona a descarga de LNAPL do meio com o rebaixamento do LNAPL no poço de monitoramento. Baseia-se na combinação de uma representação simples do fluxo para o poço (fluxo radial de estado estacionário para um poço) considerando a continuidade do volume de LNAPL dentro do poço (API, 2016). A transmissividade é determinada através de uma relação entre rebaixamento de LNAPL pelo tempo, com base em uma estimativa do raio de influência do poço, fornecida através de análise empírica.

A  $T_n$  e o desvio padrão são calculados através do método dos mínimos quadrados lineares. De acordo com este método, o logaritmo do rebaixamento varia como uma função linear do tempo, onde, a determinação da  $T_n$  é obtida através da inclinação da reta, que é ajustada nos dados de log-rebaixamento pelo tempo (API, 2016). O modelo utilizado para tal cálculo é descrito pela Equação 1.

$$T_n = r_w^2 \frac{\ln\left(\frac{S_0}{S_n}\right) \ln\left(\frac{R_{oi}}{r_w}\right)}{2jt} \quad \text{Eq. 1}$$

onde,  $T_n$  = Transmissividade do LNAPL [ $L^2/t$ ];  $S_0$  = Rebaixamento máximo induzido [L];  $S_n$  = Rebaixamento do LNAPL no tempo  $t$  [L];  $j$  = Razão entre a mudança no rebaixamento para mudança de espessura durante o período de recuperação que está sendo analisado;  $t$  = tempo de teste [T];  $R_{oi}$  = Raio de influência [L];  $r_w$  = Raio efetivo do poço [L].

O método de Cooper & Jacob (1946) determina a transmissividade do LNAPL com base na descarga dessa substância no poço e no seu rebaixamento em função do tempo. O método também requer a estimativa de um coeficiente de armazenamento do LNAPL. O coeficiente de armazenamento é importante no que se refere aos dados iniciais da recuperação dos poços, pois esses valores podem ser afetados pela drenagem do filtro e não refletir o fluxo natural do LNAPL da formação para o poço (API, 2016). Nesse método são comparados os valores de volumes acumulados de entrada (fluxo para o poço) medidos com aqueles calculados, usando a equação de Cooper & Jacob para cada incremento de tempo (API, 2012).

Para o cálculo da transmissividade por esse método, utiliza-se o modelo apresentado na Equação 2, onde se faz necessária a minimização do erro, dado pela soma dos quadrados das diferenças (SSD).

$$SSD = \sum_{j=l}^N \left[ \sum_{t=l}^J Q_{nt} \Delta t_t - \sum_{t=l}^J \frac{4\pi T_n S_i}{\ln(2.25 T_n (t_{t+\frac{1}{2}} - \Delta t_a) / r_w^2 S_n)} \Delta t_i \right]^2 \quad \text{Eq. 2}$$

onde,  $N$  = Número de incrementos de tempo durante o *bailedown test*;  $\Delta t_i = t_{i+1} - t_i$ ,  $t_{t+1/2} = (t_i + t_{i+1})/2$ ;  $\Delta t_a$  = Fator de ajuste de tempo que pode ser aplicado.

A estimativa da descarga de formação (recarga de poço) é baseada em alterações nos valores de profundidade do LNAPL (DTP) e profundidade da água (DTW). As mudanças nos níveis dos fluidos são comparadas aos valores inicialmente verificados, determinando-se assim o



armazenamento efetivo associado ao poço; sendo que este armazenamento pode incluir apenas o volume do poço ou o volume do poço mais alguma fração dos poros do pré-filtro, que foi drenado durante o teste de recuperação (API, 2016).

A função *J-ratio* é uma relação linear entre a o rebaixamento do LNAPL e a espessura do LNAPL verificada no poço; e a magnitude desse parâmetro é variável de acordo com a recarga do LNAPL no poço. Se, durante um teste de baildown o LNAPL for removido do poço sem retirada de água e a elevação do lençol freático permanecer constante, o valor de J será:

$$J = - (1 - \rho_r) \quad \text{Eq. 3}$$

onde,  $\rho_r$  é a relação de densidade LNAPL-água. Se o LNAPL e a água forem removidos durante um teste de recuperação e a transmissividade LNAPL exceder muito a transmissividade da água para recarga no poço, então a elevação da interface LNAPL-água pode permanecer constante e J será igual a -1. Valores abaixo de -1 podem indicar a influência da elevação do lençol freático e esse fenômeno pode ser visto com o aumento nas elevações da interface ao longo do período de recuperação do poço (API, 2012).

Cabe ressaltar que o LNAPL pode estar presente em condições confinadas, suspensas ou em solos de partículas finas apresentando baixa mobilidade do LNAPL. Nos casos do LNAPL se enquadrar nas condições descritas e apresentar grande espessura no poço de monitoramento, este comportamento pode estar associado ao alívio hidrostático proporcionado pela presença do poço de monitoramento (API, 2012).

### 3.5.2 Considerações e limitações dos testes de Transmissividade do LNAPL ( $T_n$ )

Historicamente, extensos esforços de recuperação primária, secundária e terciária em reservatórios de petróleo têm demonstrado que o meio poroso possui uma capacidade substancial de retenção de LNAPL em fase móvel e imóvel (BECKETT & LUNDENGARD, 1997). Segundo os autores, fatores como baixa a permeabilidade do solo e a alta viscosidade do LNAPL dificultam a recuperação do LNAPL e, em solos saturados por água, a saturação residual de LNAPL pode variar de 2% a 60% do volume dos poros, sendo essa variação dependente das propriedades do solo e do LNAPL. Beckett & Lundengard (1997) mostraram a influência da heterogeneidade das formações na recuperação do LNAPL, sendo que solos heterogêneos, apresentaram LNAPL residual após a operação por sistemas hidráulicos de recuperação.

Conforme Gatsio et al. (2018), o valor estimado de  $T_n$  depende da metodologia aplicada, condições de teste, flutuações do lençol freático, bem como propriedades dos fluidos e

geológicas. Esses fatores, por sua vez, estão relacionados de uma maneira complexa, por exemplo, a histerese afeta a relação entre permeabilidade relativa, pressão capilar e saturação, determinada pelas propriedades geológicas e dos fluidos.

Outro aspecto que afeta o valor da  $T_n$  e a capacidade de recuperação do LNAPL são as flutuações do nível do lençol freático (GATSIO et al., 2018). Segundo Beckett & Huntley (2015) variações no nível d'água afetam a redistribuição do LNAPL em subsuperfície, influenciando sua mobilidade e seu particionamento para outras fases e, consequentemente, os valores estimados de  $T_n$  por ordens de magnitude. Lenhard & Parker (1990) demonstraram que o deslocamento vertical induzido da massa de LNAPL para zonas com diferentes permeabilidades intrínsecas e a geração de fase residual decorrentes da flutuação no nível d'água resultam em alterações nos valores de  $T_n$ . Palmier et al. (2016) relatam uma diferença de 20% em  $T_n$  durante períodos de embebição ou drenagem em meios porosos homogêneos.

Conforme apresentado em diversos estudos, a  $T_n$  é variável de acordo com interações entre o meio físico, condições do teste e propriedades do LNAPL. Estas interações são afetadas por condições variáveis do nível d'água ao longo do tempo; esse efeito é observado em locais onde os níveis de água subterrânea variam muito sazonalmente ao longo de anos, em virtude da variação climática (HAWTHORNE & KIRKMAN, 2011).

Valores de  $T_n$  são insignificantes ou nulos em situações onde a água subterrânea encontra-se mais elevada, apresentando valores mais elevados com o rebaixamento do lençol freático. Este comportamento está relacionado à remobilização do LNAPL que se encontrava na forma residual (BECKETT e HUNTLEY, 2015). O conhecimento do perfil de saturação do LNAPL nas condições reais em campo é importante, pois sem essa informação as estimativas da condutividade LNAPL dos testes de recuperação do LNAPL são bastante incertas (HUNTLEY, 1999).

Gatsio et al. (2018) ressaltam ainda a importância de se avaliar as condições em que o LNAPL se encontra em subsuperfície, pois a metodologia de análise dos dados deve considerar condições confinadas, não confinadas ou suspensa, visto que tais condições indicam metodologias distintas para se estimar a  $T_n$ . Beckett & Huntley (2015) também consideram o efeito transitório nos valores de  $T_n$  em decorrência do tempo de contaminação por LNAPL. Em situações onde a contaminação é recente, os valores de  $T_n$  são mais elevados em decorrência da mobilidade da fase livre, com o seu avanço em subsuperfície. A mesma tende a diminuir sua mobilidade em virtude da diminuição na saturação do LNAPL nos poros (GATSIO et al., 2018).

Simon (2012) aponta que, historicamente, o conceito de limpeza integral das áreas contaminadas por LNAPL era aceita. Essa abordagem geral, embora intuitivamente prática, negligencia alguns pontos importantes que devem ser destacados. Na maioria dos casos, a remoção completa do LNAPL dos poros pequenos do aquífero não é possível devido a forças físicas.

Porém, com o entendimento das interações envolvendo as propriedades do LNAPL e do meio subterrâneo, essa abordagem deixou de ser aceita integralmente, agregando novos conceitos para a gestão das áreas contaminadas, como a avaliação da transmissividade do LNAPL, métrica essa que não garante necessariamente a remoção integral do LNAPL, mas avalia o potencial de mobilidade, ampliando assim as possibilidades de gestão dessas áreas (SIMON, 2012).

Sabe-se que a transmissividade do LNAPL pode fornecer uma métrica confiável para avaliar a remediação do LNAPL. No entanto, a adoção do  $T_n$  até o momento não foi universal (KIMBALL et al., 2018). Nos Estados Unidos, esse novo conceito de avaliação das áreas contaminadas foi aceito por numerosos grupos de trabalho e agências reguladoras, incluindo a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos da América (US EPA), Sociedade Americana para Testes e Materiais (ASTM), Tecnologia Interestadual e Conselho Regulador (ITRC), Agência de Controle de Poluição de Minnesota (MPCA), Conselho do Texas sobre Qualidade Ambiental (TCEQ) e Missouri Departamento de Recursos Naturais (MDNR) (SIMON, 2012).

Visando a recuperação efetiva do LNAPL, a ITRC propôs em 2009 para os EUA uma faixa de referência de 0,1 a 0,8  $\text{ft}^2 \text{dia}^{-1}$  (aproximadamente 0,0093 a 0,074  $\text{m}^2 \text{dia}^{-1}$ ) como indicativo do potencial de recuperação do produto. Os estados de Michigan e do Nebraska adotaram como indicativo do potencial de recuperação valores de  $T_n$  0,5  $\text{ft}^2 \text{dia}^{-1}$ , enquanto no estado de Massachusetts o valor limite de taxa de recuperação de LNAPL adotado foi o de 0,8  $\text{ft}^2 \text{dia}^{-1}$  (KIMBALL et al., 2018).

Com vistas a essa nova aceitação e regulamentação dos órgãos ambientais, diversos trabalhos envolvendo testes de  $T_n$  vêm sendo realizados ao longo dos últimos anos. Estes testes têm auxiliado na gestão e tomada de decisões em áreas contaminadas por LNAPL.

### **3.6 Estudos de caso de contaminação por LNAPL**

Kimball et al. (2018) realizaram uma pesquisa através de um aplicativo de internet sobre o aceite do parâmetro de Transmissividade de LNAPL pelas agências regulamentadoras, como ferramenta de gestão de áreas contaminadas. A pesquisa foi vinculada aos e-mails das

agências regulamentadoras dos Estados Unidos (EUA), Canadá, Austrália e Nova Zelândia. (KIMBALL et al., 2018). Vinte e seis respostas de 50 enviadas às Agências Regulamentadoras foram recebidas dos Estados Unidos. No Canadá, 5 respostas foram recebidas das 10 submissões para as Províncias e a Agência Federal; na Austrália, foram 3 respostas de seis submissões às Autoridades das Agências Estaduais de Proteção Ambiental e uma resposta foi recebida dos Conselhos Regionais da Nova Zelândia (KIMBALL et al., 2018).

Aproximadamente 65% dos respondentes da pesquisa aceitam a Tn como métrica para determinar se a recuperação do LNAPL foi concluída ou para acompanhar o progresso da remediação (KIMBALL et al., 2018). Das respostas enviadas pelas agências dos Estados Unidos, 18 aceitam a Tn para avaliar a viabilidade de remediação do LNAPL, 8 responderam que não aceitam a métrica e, dentro das respostas negativas, foi enfatizada a estabilização da fase livre e os fatores de risco à saúde, independentemente da quantificação Tn (KIMBALL et al., 2018).

Nos demais países pesquisados, a resposta foi similar, tendo 67% das respostas o aceite da Tn como métrica na avaliação de áreas contaminadas por LNAPL, sendo esse aceite em 60% das respostas do Canadá, 100% na Austrália e 0% na Nova Zelândia (KIMBALL et al., 2018).

Gatsios et al. (2018) publicaram os resultados de uma pesquisa onde foi avaliada a Transmissividade de LNAPL em locais com incidência de flutuações do lençol freático. Neste trabalho foram realizados testes em três pontos de uma área homogênea, contaminada por gasolina na Austrália Ocidental. Os autores fizeram a comparação dos valores de Tn obtidos por meio de testes de *baildown* e pela metodologia *skimming*. Nessas áreas, também foram utilizados métodos de caracterização de alta resolução para explicar as diferenças no perfil estratigráfico e na distribuição LNAPL (GATSIOS et al., 2018). Como resultado, os autores encontraram valores de Tn na faixa de 0 a 2,13 m<sup>2</sup> dia<sup>-1</sup>, exibindo uma forte variabilidade espacial e temporal. A pesquisa também indicou que as reduções de Tn podem ser mais afetadas pela elevação da superfície potenciométrica do que pela aplicação de tecnologias de recuperação de massa. Os autores também avaliaram a influência das condições do subsolo na precisão dos valores de Tn (GATSIOS et al., 2018).

Uma questão importante verificada nesse trabalho foi a menor sensibilidade dos valores de Tn pelas mudanças no lençol freático na área onde foi verificada saturação mais elevada e maior distribuição vertical de LNAPL (GATSIOS et al., 2018). A métrica Tn se mostrou confiável sob condições de estabilidade do lençol freático. Com base no exposto, os autores indicam que em áreas que apresentem condições variáveis do nível d'água os valores de Tn podem ser afetados significativamente, portanto é necessária cautela nas decisões exercidas nesses cenários (GATSIOS et al., 2018).

As empresas *Union Oil* e *PacifiCorp* (2014), através da empresa *Arcadis*, localizada em Portland, Oregon, prepararam um relatório sobre um teste piloto de recuperação de LNAPL realizados no Antigo Terminal de Petróleo e planta de manufatura de gás, situado na Marina Drive, em Astoria, no estado de Oregon, nos Estados Unidos. Para a avaliação da mobilidade e potencial de recuperação, foram utilizados teste de Transmissividade de LNAPL no ano de 2014. Nesses testes foram verificados valores de  $T_n$  que variavam de 0,03 a 0,04  $\text{ft}^2 \text{dia}^{-1}$  (aproximadamente 0,0028 a 0,0037  $\text{m}^2 \text{dia}^{-1}$ ). Esses valores encontrados foram relativamente baixos quando confrontados com os limites de recuperação de massa estabelecidos pela ITRC que são de 0,1 a 0,8  $\text{ft}^2/\text{dia}$  (UNION OIL & PACIFICORP, 2014).

Nesse contexto, foram propostas técnicas de recuperação de massa: remoção por bombeamento através de bomba peristáltica; remoção por bombeamento após o aquecimento do LNAPL; remoção do LNAPL através de mantas absorventes e remoção do LNAPL por escumadores automáticos (UNION OIL & PACIFICORP, 2014). Nos testes pilotos não foram verificadas diferenças significativas entre os valores de recuperação e técnicas de remediação empregadas. Este resultado foi relacionado à viscosidade do LNAPL e sua baixa  $T_n$  (UNION OIL & PACIFICORP, 2014). Dentro das técnicas apresentadas a que obteve maior destaque foi a de remediação passiva, não pela sua taxa de remoção, mas sim por fatores envolvendo a baixa mobilidade do contaminante e pelos custos de implantação e manutenção (UNION OIL & PACIFICORP, 2014).

No Brasil existem, atualmente, muitos poucos estudos envolvendo o uso de  $T_n$ . Um dos casos realizados em território nacional foi apresentado por Gomes et al. (2016), cujo objetivo do projeto era discutir o uso da remediação passiva quando a recuperação ativa de combustível ainda presente em fase livre não era mais eficiente. Como justificativa para a abordagem dessa técnica, os autores apontaram a redução de custo, o não consumo de energia elétrica, geração reduzida de resíduos, não extração de água, fácil implantação e não inserção de novas substâncias químicas no subsolo (GOMES et al., 2016). Esse trabalho foi realizado no estado de Minas Gerais, tendo como contexto hidrogeológico um solo de granulometria fina, baixa condutividade hidráulica e variação no nível de água entre 5 a 8 metros. Os testes de  $T_n$  foram realizados durante todo o processo de remediação ativa da área, que ocorreu no período de 2004 a 2012. Os valores de  $T_n$  aferidos variaram de aproximadamente 0,02 a 0,055  $\text{m}^2 \text{dia}^{-1}$  na primeira campanha, realizada entre os anos de 2004 a 2005, de 0,005 a 0,06  $\text{m}^2 \text{dia}^{-1}$  na segunda campanha, realizada entre 2005 e 2006; de 0,048 a 0,05  $\text{m}^2 \text{dia}^{-1}$  na terceira campanha, entre os anos de 2008 e 2009; 0,032  $\text{m}^2 \text{dia}^{-1}$  na quarta campanha, entre os anos de 2009 a 2010 e de 0 a 0,01  $\text{m}^2 \text{dia}^{-1}$  na quinta campanha, realizada entre os anos de 2011 e 2012. Os baixos valores de recuperação de massa de LNAPL atrelado ao baixo valor de  $T_n$  justificaram alteração de estratégia de remediação (GOMES et al., 2016).

### **3.7 Geologia do Estado de São Paulo**

Uma vez que as áreas deste estudo estão localizadas no Estado de São Paulo, é importante conhecer o contexto geológico em que elas se inserem. A maior parte (70%) do território do Estado de São Paulo encontra-se na Bacia Sedimentar do Paraná (Devoniano ao Cretáceo) e 30% no Embasamento Cristalino (com idades entre Arqueano e Proterozóico Superior), além de possuir pequenas áreas com coberturas cenozoicas, incluindo bacias intracontinentais e costeiros quaternários (MANTESSO-NETO et al., 2013).

Sobre o Embasamento Cristalino encontra-se assentada 85% da Região Metropolitana de São Paulo (HASUI & SADOWSKI, 1976) e a cidade de São Paulo localiza-se quase que totalmente sobre a Bacia Sedimentar de São Paulo, de idade Cenozóica (RODRIGUEZ, 1998). A Bacia Sedimentar de São Paulo se espalha por uma área ovalada, sendo composta pelas Formações Itaquaquecetuba, São Paulo, Tremembé e Resende (RODRIGUES, 1998).

Quanto à litologia do Complexo Cristalino, estudos cronológicos indicam as rochas ígneas e metamórficas (porção sudeste) como sendo a porção mais antiga do território do estado de São Paulo, supõe-se que essas rochas tenham se formado em profundidade e seu afloramento esteja ligado a erosão das camadas subjacentes (CPRM, 2006).

A Bacia Sedimentar de São Paulo é composta por sedimentos aluviais depositados na era Terciária, contendo materiais como argilitos, siltitos e arenitos finos argilosos, associados com depósitos aluviais Quaternários, constituídas por areia, silte e argila. Estes sedimentos encontram-se dispostos diretamente sobre rochas cristalinas Pré-Cambrianas (CPRM, 2006).

### **3.8 Solos das áreas urbanas**

Nos grandes centros a ação antrópica, altera a conformação litológica natural, através da remoção ou inserção de elementos e ou solos de diferentes áreas para uma infinidade de objetivos entre os quais, podemos destacar aterros. Os solos urbanos não possuem uma classificação completa, sendo que as definições de Solos urbanos e de Solos antrópicos, não são equivalentes. (PEDRON et al, 2004).

Solos urbanos segundo Pedron et al (2004), podem ser classificados como volumes situados em meio urbano, cuja propriedades (físico-químicas e biológicas) sofrem constantes alterações. Já os solos antrópicos segundo o autor, são aqueles significativamente alterados em decorrência das modificações pelo seu uso intenso como exploração agrícola, mineral e urbana. Para serem classificados como Antropossolos, devem conter volume formado por

camadas de materiais constituídas por material orgânico ou inorgânico em diferentes proporções, com camada superior a 40 cm. (CURCIO et al, 2004).

Tentando realizar uma estruturação taxonômica dos solos modificados por ações antrópicas, Curcio et al (2004), propôs a estrutura dividida em quatro categorias, sendo a Ordem dos antropossolos, seguido da subordem contendo as classificações de Lítico, Decapítico, Sômico e Móbilico. Abaixo desse nível encontram-se os grandes grupos sendo Áquico, Ótico, totático, Parciático, Mésclico, Camático, Équico e Inéquico, seguido do quarto e último nível envolvendo subgrupos, onde sua classificação demanda análises químicas.

## 4 MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1 Testes de Transmissividade

Para a realização dos testes de Tn foi utilizado o método *Baildown*, segundo a norma E2856-13 da ASTM (2013). Essa técnica consiste na remoção da fase livre de LNAPL do poço de monitoramento e no registro de sua respectiva recuperação. O volume de LNAPL a ser removido foi previamente determinado pela Equação 4, a fim de evitar a influência do pré-filtro no resultado da Tn (ASTM, 2013).

$$V_t = V_c + V_b = b_n \pi r_c^2 + S_{yf} b_b \pi (r_b^2 - r_c^2) \quad \text{Eq. 4}$$

onde,  $V_t$ : Volume total efetivo de LNAPL no furo de sondagem [ $L^3$ ];  $V_b$ : volume de LNAPL no pré-filtro [ $L^3$ ];  $V_c$ : volume de LNAPL no poço [ $L^3$ ];  $b_b$ : espessura de LNAPL no pré-filtro [ $L$ ];  $b_n$ : espessura do LNAPL medido [ $L$ ];  $r_c$ : raio do poço [ $L$ ];  $r_b$ : raio do furo de sondagem [ $L$ ];  $S_{yf}$ : coeficiente de armazenamento do filtro (valor empírico variando de 0,175 a 0,190 (ASTM, 2013), (sendo que nesse trabalho foi adotado o valor de 0,190).

A remoção do LNAPL foi realizada com amostradores de água subterrânea descartáveis de polietileno (*bailer*) ou com uma bomba peristáltica (marca Eijkelkamp), e o volume retirado foi medido em uma proveta graduada. Ao atingir o volume calculado, iniciou-se a medida do nível de LNAPL (NO) e do nível d'água (NA) com o medidor tipo *interface* (Heron Instruments, modelo H.OIL), até que esses dois parâmetros atingissem valores próximos aos iniciais.

Os dados de NO e NA foram registrados a cada 1 minuto durante os primeiros 30 minutos do teste. Em seguida a frequência dos registros foi alterada de acordo com o andamento do teste em cada área de estudo (Tabela 3).

Tabela 3: Registros de NO e NA durante os testes de transmissividade.

Tempo de Teste (minutos)	Intervalo entre medidas (minutos)	Número de registros de NO e NA
0 – 30	1	30
30 – 60	2	15
60 – 120	5	12
120 – 180	10	6
180 – 240	15 e 30	4 – 2
Acima de 1440		1 por dia

Fonte: O autor (2019).

Para o realizar a estimativa da  $T_n$ , foram utilizados os modelos de Bouwer & Rice (1976) e de Cooper & Jacob (1946), disponibilizados em planilhas desenvolvidas pelo Instituto Americano do Petróleo (API, 2016).

Os métodos matemáticos selecionados apresentam poucas diferenças, sendo o de Bouwer & Rice (B&R) conceitualmente mais simples. Este algoritmo é baseado em um modelo linear (equação de Thiem) que relaciona a descarga de LNAPL do meio com o valor do rebaixamento do nível de LNAPL, sendo baseado na continuidade do volume de LNAPL dentro do poço. Este método considera o logaritmo da variação do rebaixamento como uma função linear do tempo. O valor de  $T_n$  por esse método é determinado através da relação da inclinação de uma reta ajustada.

O modelo de Cooper & Jacob (C&J), por sua vez, utiliza o mesmo conceito envolvendo a recuperação e o rebaixamento do LNAPL, porém com o incremento da variável tempo, além de considerar um coeficiente de armazenamento do pré-filtro do poço de monitoramento. Os parâmetros de transmissividade e armazenamento do LNAPL são estimados através da comparação entre os valores de descarga verificados em campo, com os valores gerados através do modelo numérico.

## 4.2 Áreas de estudo

Os testes de transmissividade foram realizados entre outubro de 2016 a março de 2017 em 4 áreas contendo fase livre de LNAPL: Área 1, localizada no Município de Ribeirão Pires (SP) onde funciona um comércio varejista de combustível; Área 2, garagem de empresa de ônibus na zona sul do Município de São Paulo; Área 3, garagem de ônibus desativada na zona central

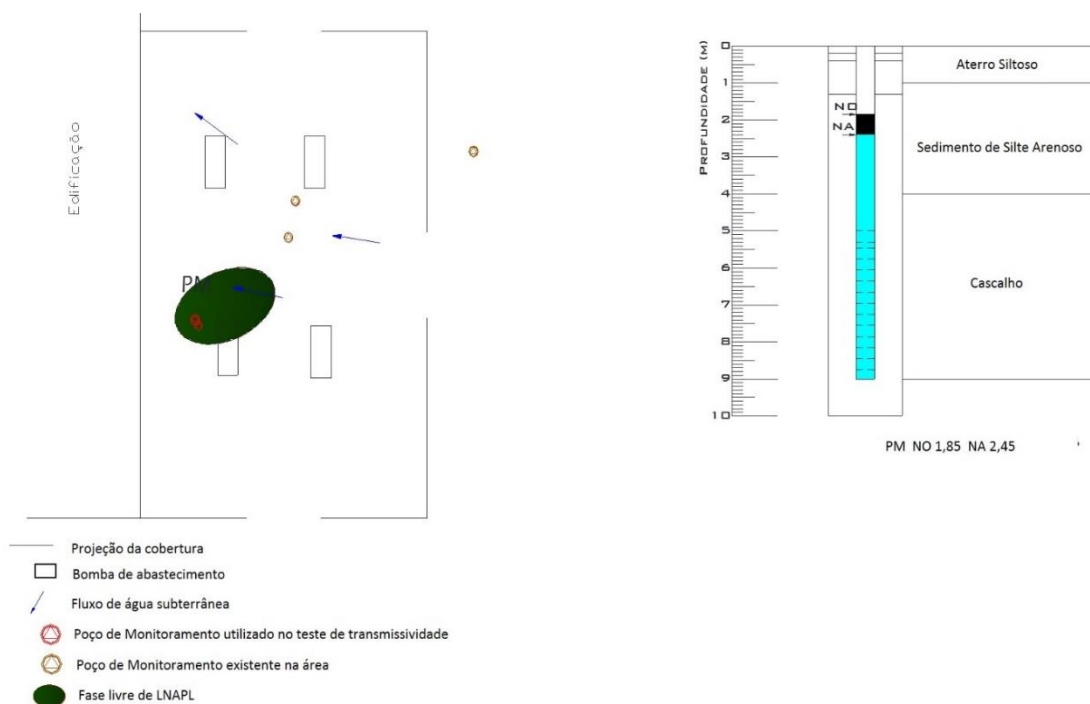


do Município de São Paulo; e Área 4, no Município de Jundiaí (SP), onde funciona um comércio varejista de combustíveis.

À **Área 1** encontra-se no Embasamento Cristalino. Nessa área observou-se a ocorrência de gnaisses altamente intemperizado, de coloração marrom acastanhada escura, gerando saprólitos, ora mais arenosos, ora mais argilosos, corroborando com dados do IPT (2000). Segundo estudos realizados por empresas de consultoria, a contaminação dessa área foi causada pelo vazamento de um tanque de armazenamento de gasolina, tendo sido realizado bombeamento de fase livre com início em 2015.

Não foi possível coletar amostras para caracterização do perfil do solo devido à impermeabilização do terreno; sendo que as informações sobre a litologia local foram retiradas do relatório de uma empresa de consultoria ambiental. Segundo essa fonte, a superfície da área é formada por material de aterro de textura siltosa, que se encontra sobre outro material silte-arenoso (com cerca de 3 m de espessura) onde está o nível d'água. Abaixo segue-se um material mais grosseiro com textura de cascalho, provavelmente por se encontrar mais próximo à rocha sã (gnaisse). O teste de transmissividade foi realizado em um único poço de monitoramento (PM), cuja caracterização do perfil construtivo e locação podem ser vistos na Figura 5.

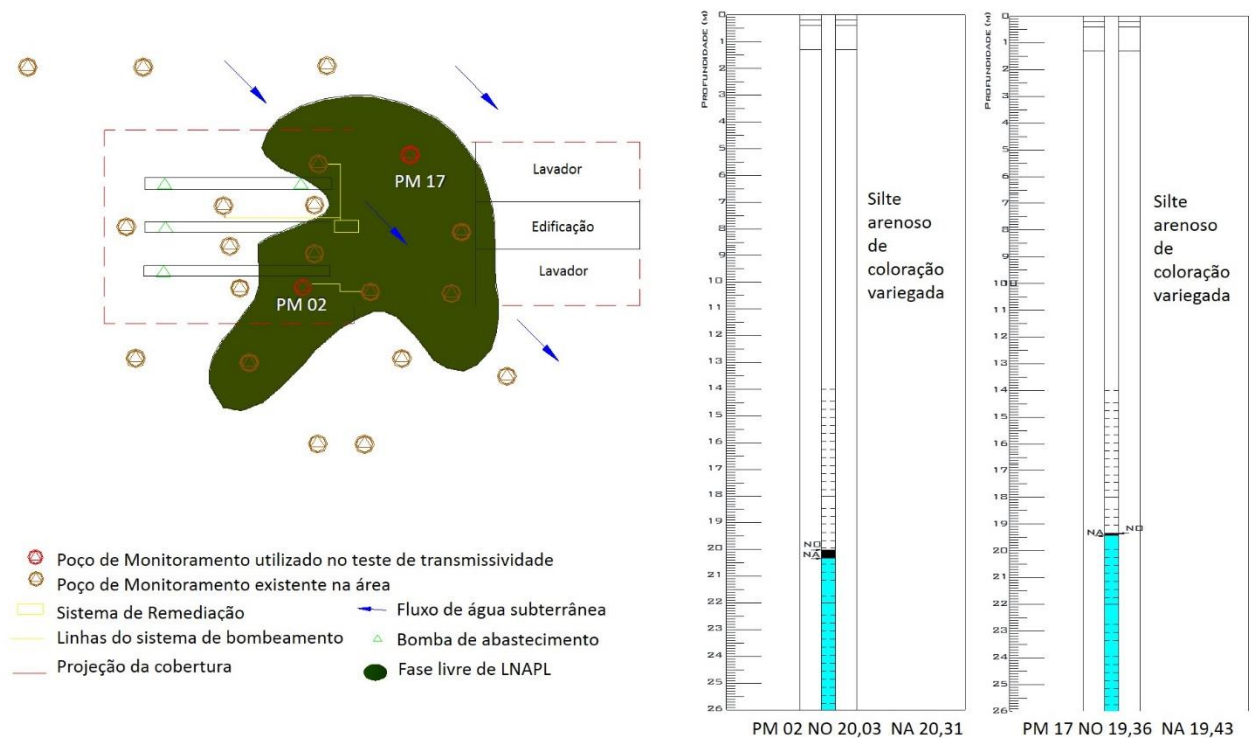
Figura 5: Esquema da Área 1 contendo a pluma de LNAPL e o perfil construtivo do poço de monitoramento.



Fonte: O autor (2019).

A **Área 2** está localizada na transição das unidades geológicas da Bacia Sedimentar de São Paulo e o Embasamento Cristalino. De acordo com o relatório de investigação da empresa, o solo da região possui textura silte-argilosa a silte-argilo-arenosa. Também não foi possível realizar a caracterização do solo e subsolo da área devido à impermeabilização do terreno mas, segundo a empresa que instalou os poços, o solo é homogêneo e possui textura silte-arenosa de coloração variegada (podendo indicar os sedimentos típicos da Bacia Sedimentar de São Paulo). A condutividade hidráulica no local possui valor médio de  $7,33 \times 10^{-5} \text{ cm s}^{-1}$  e a velocidade de fluxo foi estimada em  $11,13 \text{ m ano}^{-1}$ . Segundo a empresa de consultoria, a contaminação da área ocorreu devido ao vazamento de uma linha que conecta o tanque de armazenamento de diesel com os bicos de abastecimento. A remediação da área está sendo realizada por sistema de bombeamento em operação há um ano. Os testes de Tn nessa área foram realizados em dois poços de monitoramento (PM02 e PM17) (Figura 6).

Figura 6: Esquema da Área 2 contendo a pluma de LNAPL e o perfil construtivo dos poços de monitoramentos.



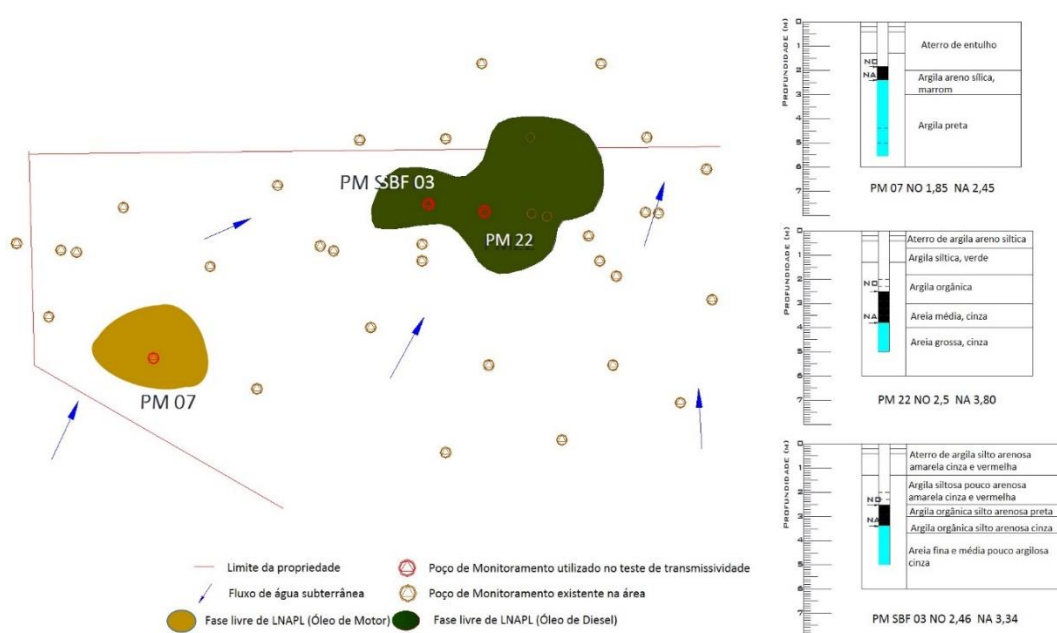
Fonte: O autor (2019).

A **Área 3** localiza-se sobre os depósitos aluviais da bacia hidrográfica do Alto do Tietê, que ocorre dentro da unidade geológica da Bacia Sedimentar de São Paulo. A área foi

contaminada durante o funcionamento de uma empresa de transporte, na década de 1940, que realizava manutenção e abastecia a frota de ônibus no local, além de armazenar combustível e resíduos de óleo. No local existem duas plumas com fase livre, sendo uma constituída por óleo diesel e outra por óleo de motor. Nesta área, ambas as plumas foram contempladas pelos testes de Tn (PM 07, PM 22 e PM SBF 03) (Figura 7). Foi possível realizar nessa área a descrição da litologia por meio de escavação a trado, uma vez que o terreno não se encontra mais impermeabilizado.

Na área de um dos poços (PM7) verificou-se uma espessa camada de aterro (cerca de 2 m), formado por restos de material de construção civil, como blocos de concreto e tijolos em meio a solo de textura argilo-silto-arenosa. Abaixo dessa camada observou-se um solo de textura argilo-areno-siltosa de coloração marrom (1 m de espessura), seguida de camada de solo com textura argilosa e cor preta de aspecto oleoso. No outro poço analisado (PM 22) a camada de aterro é menor (cerca de 0,5 m), seguida de camadas argilo-siltosa de cor verde (1 m) e outra de cor preta de aspecto oleoso (cerca de 1 m de espessura), que varia de vermelha a cinza e amarela. Abaixo da camada de aterro existe uma camada de argila-siltosa de coloração de cinza escura a amarela (1 m de espessura), seguida de areia-siltosa de coloração cinza. As características hidrogeológicas levantadas por estudos anteriores indicam que a condutividade hidráulica da área apresenta valor médio de  $1,26 \times 10^{-4} \text{ cm s}^{-1}$  e velocidade de fluxo igual a  $41,47 \text{ m ano}^{-1}$ .

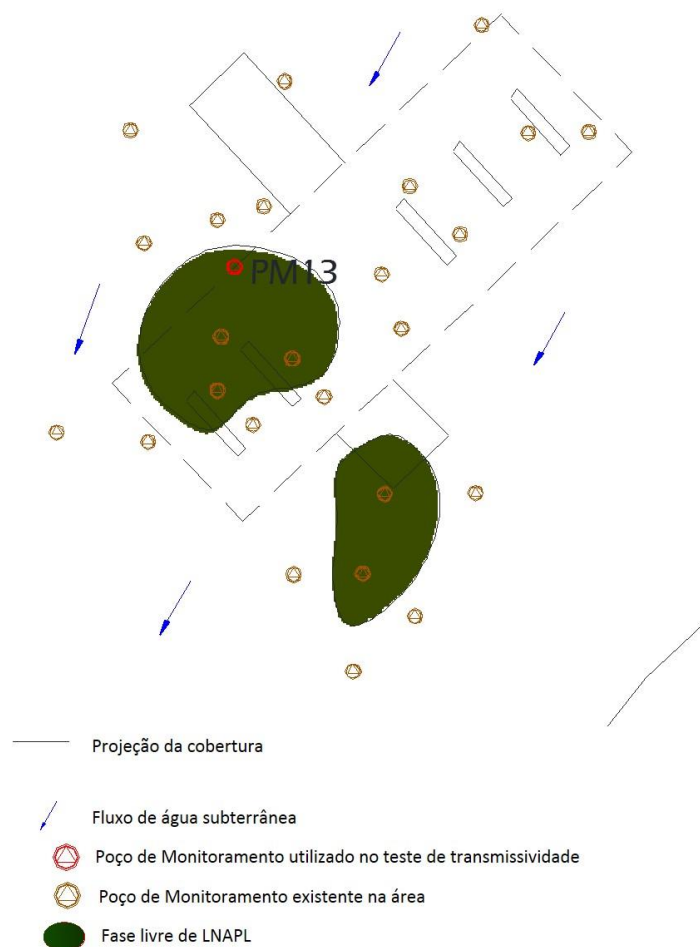
Figura 7: Esquema da Área 3 contendo as plumas de LNAPL e o perfil construtivo dos poços de monitoramentos.



Fonte: O autor (2019).

A **Área 4** encontra-se no Município de Jundiá, cujas características geológicas são muito particulares, devido à presença de importantes estruturas pré-cambrianas, fragmentos de superfícies erosivas, além de restos de depósitos sedimentares paleozoicos e cenozoicos preservados (NEVES et al., 2003). No local de estudo afloram depósitos coluviais quaternários inconsolidados formados por sedimentos argilo-arenosos que, segundo Neves *et al.* (2003) são delimitados por direções estruturais importantes. Predominam na área Latossolos Vermelho-Amarelo, Litossolos podzolizados com cascalho, hidromórficos e podzólicos vermelho-amarelo. Nessa área funciona um revendedor de combustível e ocorreram dois vazamentos em locais distintos, sendo um em uma linha de armazenamento de diesel e outro no tanque de armazenamento de óleo de troca de motor. Os dados de estudos hidrogeológicos e do perfil do solo onde os poços de monitoramento foram instalados não estavam disponíveis. O teste de Tn foi realizado no PM 13, onde ainda há fase livre formada pela contaminação por diesel (Figura 8).

Figura 8: Croqui da Área 4 de estudo contendo as plumas de LNAPL e PM utilizado para o teste de Tn.



Fonte: O autor (2019).

### 4.3 Caracterização do LNAPL

Durante o trabalho de campo foram realizadas coletas de amostras de LNAPL para posterior determinação de viscosidade e densidade em laboratório. A densidade e a viscosidade do LNAPL foram determinadas no Laboratório Multidisciplinar de Águas e Solos (LAMAS) da UNIFESP – Campus Diadema. A densidade ( $\rho$ ) foi obtida pela razão entre a massa e o volume de NAPL. A massa de LNAPL foi medida através de uma seringa de preenchida com 100  $\mu\text{L}$  do LNAPL, utilizando uma balança semi-analítica da marca Shimadzu, modelo BL320H.

As viscosidades relativas das amostras ( $\mu_{\text{rel}}$ ) foram determinadas através da Equação 4, onde uma amostra do LNAPL foi inserida em um viscosímetro de *Ostwald* e foi monitorado o tempo (t) para o produto fluir por um tubo capilar sob influência da gravidade (UFG, 2010).

$$\mu_{\text{rel}} = \frac{\mu_{\text{LNAPL}}}{\mu_{\text{água}}} = \frac{\rho_{\text{LNAPL}} * t_{\text{LNAPL}}}{\rho_{\text{água}} * t_{\text{água}}} \quad \text{Eq. 4}$$

onde,  $\mu_{\text{LNAPL}}$ : viscosidade do LNAPL ( $\text{kg m}^{-1}\text{s}^{-1}$ ),  $\rho_{\text{LNAPL}}$ : densidade do LNAPL ( $\text{mg L}^{-1}$ ),  $\mu_{\text{água}}$ : viscosidade da água ( $\text{kg m}^{-1}\text{s}^{-1}$ ),  $\rho_{\text{água}}$ : densidade da água ( $\text{mg L}^{-1}$ ),  $t_{\text{LNAPL}}$ : tempo do LNAPL ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $t_{\text{água}}$ : tempo da água ( $^{\circ}\text{C}$ ).

## 5 RESULTADOS

No total foram realizados 12 testes de transmissividade distribuídos nas 4 áreas de estudo. Os parâmetros analisados e determinados em cada poço de monitoramento por área encontram-se resumidos na Tabela 4.

Os subitens seguintes apresentam um detalhamento do comportamento observado em cada área e dados obtidos.

Tabela 4: Descritivo geral dos testes.

Parâmetros monitorados	Área 1	Área 2				Área 3						Área 4
	PM 1	PM2			PM 17	PM 22		PM SBF03		PM 7		PM 13
	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4	Teste 5	Teste 6	Teste 7	Teste 8	Teste 9	Teste 10	Teste 11	Teste 12
Data de início do teste Tn	23/11/16	07/10/16	29/10/16	08/02/17	21/11/16	12/12/16	09/03/17	12/12/16	09/03/17	12/12/16	09/03/17	01/07/17
NO inicial (m)	5,735	19,600	20,028	20,048	19,365	2,428	2,503	2,452	2,517	1,848	1,766	7,039
NA inicial (m)	5,770	18,820	20,310	20,080	19,435	3,762	3,805	3,340	3,905	2,450	1,835	8,053
Espessura da fase livre (m)	0,035	0,220	0,282	0,032	0,07	1,334	1,302	0,888	0,578	0,620	0,069	1,014
Recuperação fase livre (%)	94	-	37	62	50	92	95	30	37	14	86	31
Duração do teste (min)	8349	61	406	70	6090	15593	127113	14428	126912	15767	126728	54790
Densidade NAPL a 21°C (g mL <sup>-1</sup> )	0,86	0,83	0,84	0,81	0,84	0,82	0,85	0,84	0,84	0,83	0,85	0,83
Viscosidade relativa NAPL a 21°C	6,59	3,60	3,66	3,50	3,40	7,31	5,17	7,90	5,41	16,33	10,60	3,40
Valor médio de Tn (m <sup>2</sup> d <sup>-1</sup> )	0	*	0	0	*	0,082	0,122	0,0015	0,0065	0	0	0

Fonte: O autor (2019).

\*Não foi possível calcular

Anexos – resultados de todos os testes

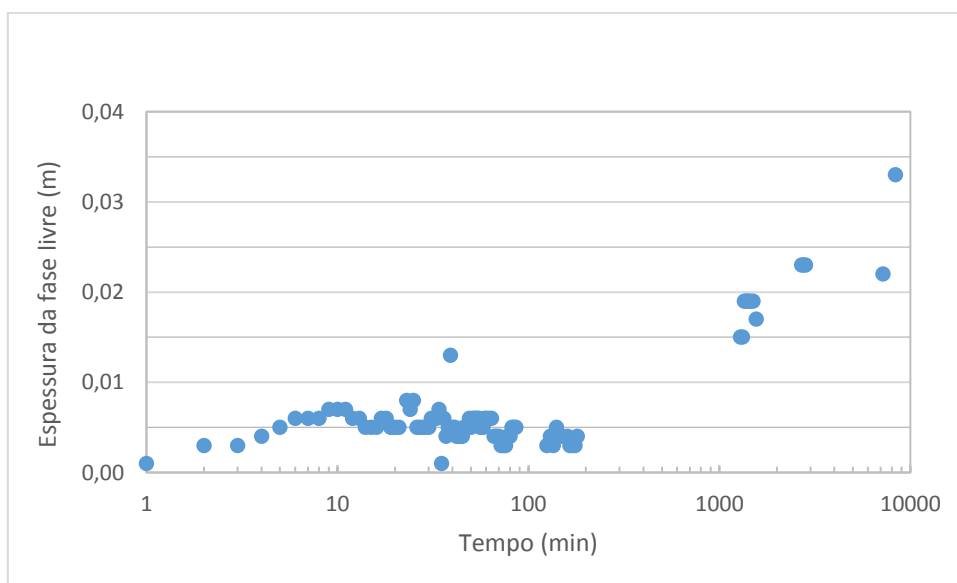
## 5.1 Testes de transmissividade: observações de campo e tendências observadas

### 5.1.1 Área 1

No teste realizado na Área 1 (Teste 1), a fase livre inicial era de 0,035 m, e foi observada uma elevação contínua do NA durante o período pré-teste, sendo que esse comportamento se manteve durante a remoção de LNAPL e continuou durante todo o período monitorado (6 dias) (Anexo 1). Durante o período de recuperação do poço ocorreram chuvas, que contribuíram para um rápido aumento do nível d'água (NA) e, por isso o teste teve que ser interrompido temporariamente. Nesse caso, somente os registros obtidos antes da precipitação foram considerados para o cálculo de  $T_n$ .

Quanto à fase livre, observou-se que a espessura da mesma oscilou entre 5 a 7 mm durante a primeira hora de monitoramento, e aumento significativo após 1000 min (~15 h) (Figura 9). Verificou-se, também, uma instabilidade nos níveis dos fluídos, ocasionando a variação na espessura do LNAPL no poço durante a recuperação do poço.

Figura 9: Recuperação do LNAPL no poço da Área 1 dada pela variação de sua espessura em função do tempo de monitoramento.



Fonte: O autor (2019).

### 5.1.2 Área 2

Nessa área encontrava-se em operação um sistema de remediação por bombeamento, responsável pela geração de gradientes de pressão que influenciaram no fluxo de água subterrânea. Ao avaliar o comportamento dos poços durante os monitoramentos, observou-se que em todos os testes realizados ocorreu a elevação do nível d'água durante a recuperação do poço. Nesta área foram realizados quatro testes entre outubro de 2016 e fevereiro de 2017: três no PM 02 e um no PM 17 (Teste 2, Teste 3, Teste 4 e Teste 5).

- PM 02

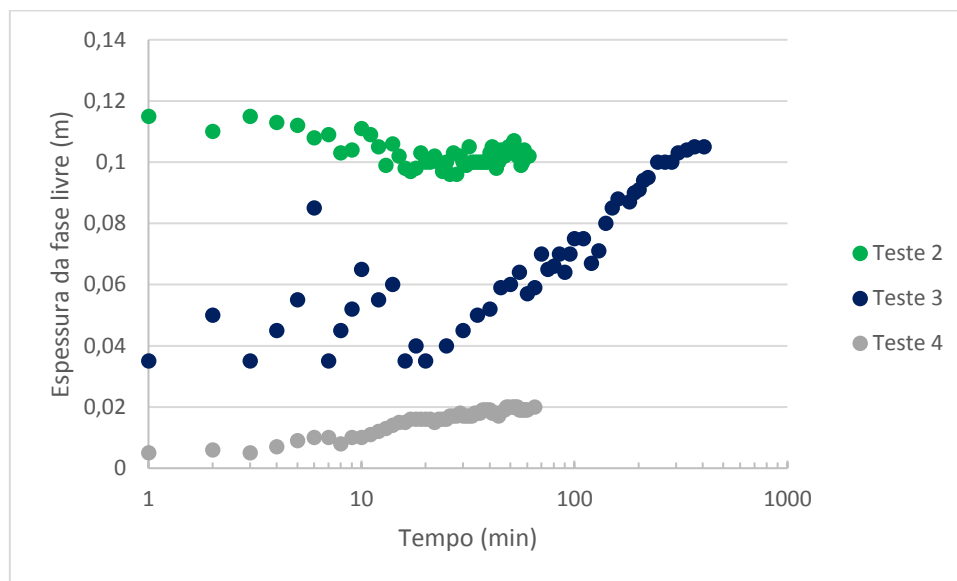
O Teste 2 (fase livre inicial era de 0,220 m) realizado nesse poço apresentou baixa variação na espessura do LNAPL (Anexo 2). Isso pode ter ocorrido pelo fato de não ter sido retirado o volume total do LNAPL. Outro fator que pode ter influenciado foi a remoção de água durante o processo de purga do poço. Além disso, durante esse teste, que teve duração de apenas 1 hora, o sistema de remediação por bombeamento encontrava-se em operação.

O Teste 3 (fase livre inicial de 0,282 m) (Anexo 2) apresentou variações abruptas logo nos primeiros minutos. Após esse período, a taxa de recuperação do poço se manteve constante, apresentando um aumento progressivo na espessura do LNAPL durante o período avaliado de aproximadamente 7 horas. Dessa vez, para reduzir a interferência do sistema de bombeamento, o teste foi iniciado uma hora após o seu desligamento.

O Teste 4 (fase livre inicial de 0,032) (Anexo 2) foi iniciado aproximadamente 72 horas após o desligamento do sistema de bombeamento. Dessa vez a recuperação da fase livre foi constante ao longo do período avaliado de aproximadamente 70 minutos, resultando numa curva de recuperação log-linear (Figura 10). Quando comparado ao teste anterior, observou-se menor espessura da fase livre e menores taxas de recuperação.



Figura 10: Recuperação da fase livre em PM 02 da Área 2 dada pela variação de sua espessura em função do tempo de monitoramento.



Fonte: O autor (2019).

- PM 17

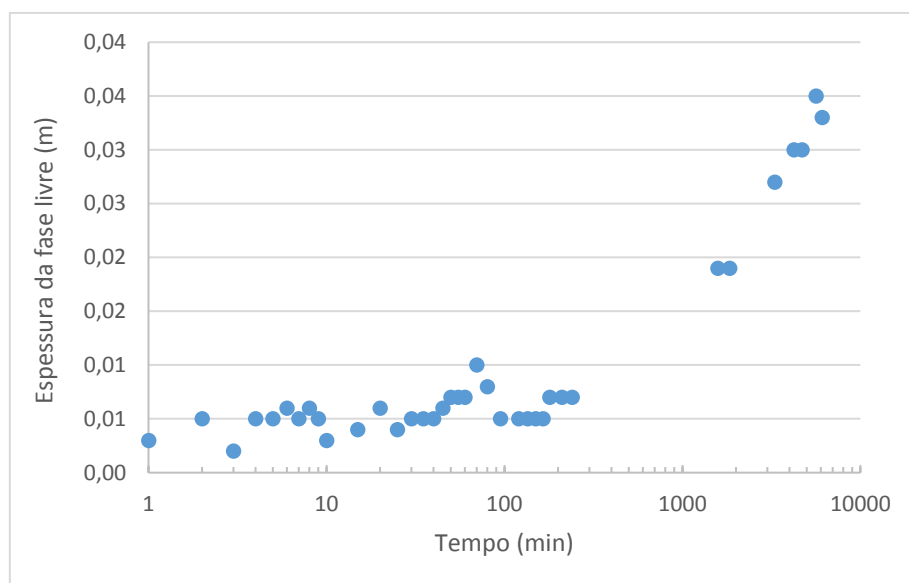
O Teste 5 (fase livre inicial 0,07 m) no PM 17 teve início em 21/11/2016 e duração de aproximadamente 4,5 dias. O poço de monitoramento testado estava fora da zona de influência do bombeamento do sistema de remediação. No entanto, esse poço estava instalado dentro da área de lavagem de veículos, o que gerou a hipótese de que a origem do LNAPL encontrado no poço seria a água de lavagem de veículos.

Foi evidenciado o aporte de produto pela superfície, através da presença de material oleoso no fuso do cap e flotação de LNAPL no líquido presente na câmara de calçada do poço de monitoramento, após atividades de lavagem dos veículos.

O monitoramento nesse poço foi realizado até a recuperação de 50% da espessura inicial do LNAPL. Notou-se que os valores de NA e NO apresentaram uma diminuição ao longo do período de monitoramento (Anexo 3). No início do teste, o NA teve um rebaixamento de aproximadamente 0,12 m em relação ao nível inicial, sendo que essa diminuição chegou à 0,17 m. Quanto à recuperação do poço após o *Baildown*, foi verificado o aumento do NO durante o monitoramento no período da manhã, sendo que a lavagem de veículos ocorria à noite. Outro ponto que evidencia a hipótese de contribuição pela atividade de lavagem é que os níveis medidos durante o monitoramento realizado pela manhã mantinham-se estáveis até o final do dia, ou seja,

antes da atividade de lavagem dos veículos. Na Figura 11 esse comportamento pode ser observado no agrupamento de dois dados nos quais a espessura se mantém em intervalos de tempos maiores. Esse comportamento se repete durante todo o teste, e pode ser visualizado, por exemplo, nos períodos entre 4 e 240 minutos e 1580 e 1840 minutos.

Figura 11: Recuperação da fase livre em PM 17 da Área 2 dada pela variação de sua espessura em função do tempo de monitoramento.



Fonte: O autor (2019).

### 5.1.3 Área 3

Na área 3 foram realizados 6 testes de medida de transmissividade, entre dezembro de 2016 a março de 2017, nos poços de monitoramento PM 22, PM SBF 03 e PM 07 (Teste 6, Teste 7, Teste 8, Teste 9, Teste 10 e Teste 11)

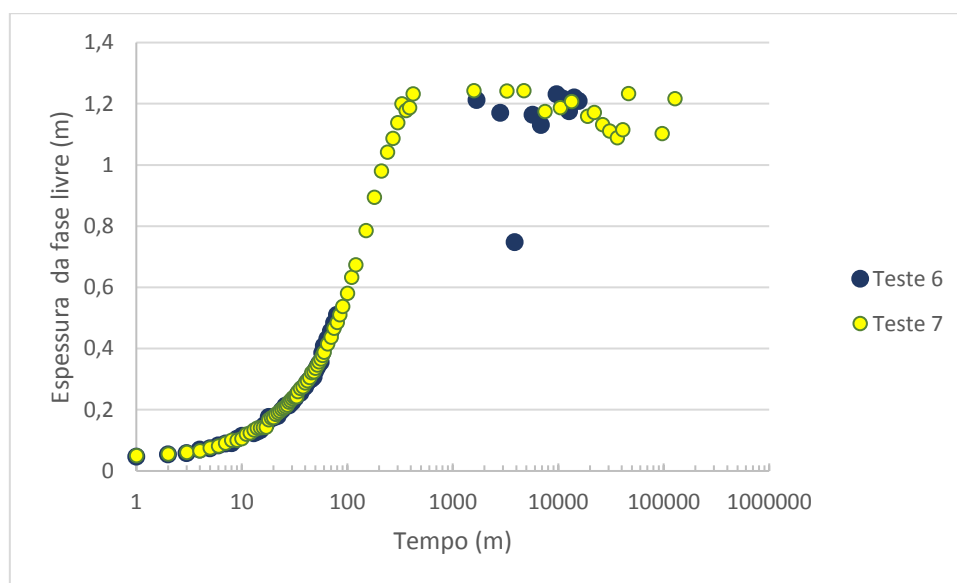
- PM 22

Nesse poço foram realizados dois testes de Tn (Teste 6, fase livre inicial 1,334 m e Teste 7, fase livre 1,302 m), sendo que o primeiro levou cerca de 11 dias e o segundo, 88 dias. Este poço apresentou os maiores valores de transmissividade avaliados nesse estudo, e o comportamento da variação dos NA e NO durante o monitoramento foi o esperado, ou seja, tendendo aos valores iniciais, com as curvas se afastando uma da outra como curvas espelhadas (Anexo 4). Quanto à avaliação da recuperação, os dois testes realizados demonstraram similaridade (Figura 12), caracterizadas por taxa de recuperação elevada durante os instantes iniciais de monitoramento e, posteriormente

(a partir de 1000 minutos), observou-se uma estabilização, com pequenas variações na espessura.

Durante a realização do primeiro Teste 6, ocorreram chuvas, que podem ter influenciado para a elevação do NA, em virtude de problemas construtivos no PM. Como consequência dessa elevação, observou-se uma diminuição na espessura do LNAPL no poço de monitoramento e valor de  $T_n$  ficou ligeiramente inferior ao do segundo teste.

Figura 12: Recuperação da fase livre em PM 22 da Área 3 dada pela variação de sua espessura em função do tempo de monitoramento.



Fonte: O autor (2019).

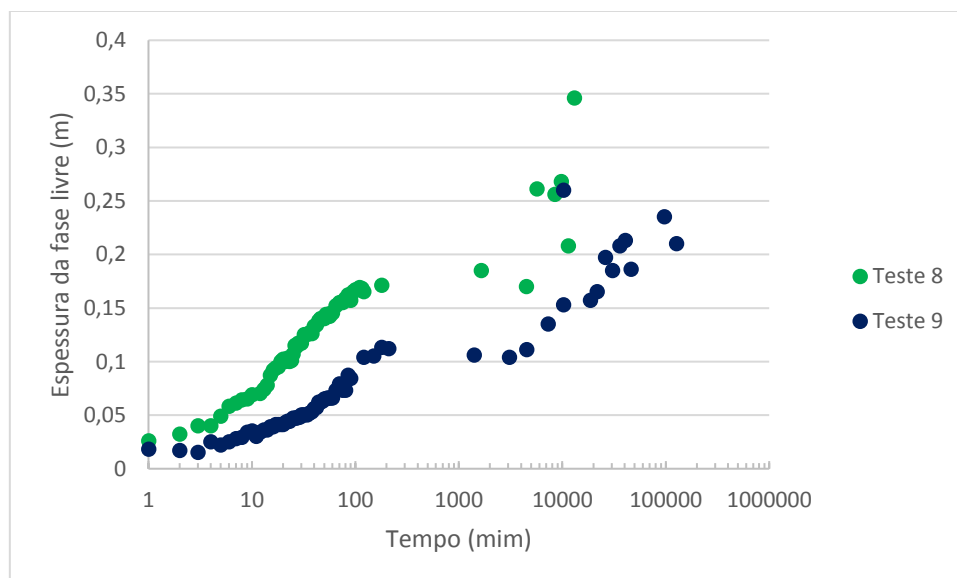
- PM SBF 03

Esse poço localiza-se na borda da mesma pluma de fase livre onde se encontra o PM 22. O primeiro teste (Teste 8, fase livre inicial 0,888 m) teve início em 12/12/2016 e durou 11 dias, enquanto que o segundo teste (Teste 9, fase livre inicial de 0,578 m) teve duração de aproximadamente 88 dias.

Os dois testes realizados nesse poço de monitoramento apresentaram comportamentos semelhantes e próximos do esperado até 100 minutos, ou seja, com valores de NA descendentes e NO ascendentes, ambos tendendo aos níveis iniciais (Anexo 5). Observou-se, após esse período, valores de espessura de LNAPL com pouca variação por aproximadamente uma semana de monitoramento. Após esse período, a espessura de LNAPL no interior do PM aumentou, chegando a pouco mais de 30% da espessura inicial.

Foi observada uma recuperação da espessura de fase livre mais rápida e maior no primeiro teste quando comparado ao segundo (Figura 13). Esse fato pode estar relacionado ao maior volume do LNAPL observado na primeira campanha. A recuperação mais rápida no primeiro teste pode estar associada à posição ligeiramente mais profunda do NA no primeiro teste (3,340 m), em comparação ao segundo (3,095 m). O NA mais profundo observado no primeiro teste justifica a maior espessura de LNAPL encontrada nesse poço (0,888m) em relação à do segundo teste (0,578 m) em virtude da conversão da fase residual em fase livre. A posição mais rasa do NA no Teste 9 indica que uma porção maior do NAPL pode estar retida como fase residual, diminuindo sua mobilidade e consequentemente reduzindo a sua taxa de recuperação. Esse comportamento também foi observado no PM 02 da Área 2.

Figura 13: Recuperação da fase livre em PM SBF 03 da Área 3 dada pela variação de sua espessura em função do tempo de monitoramento.



Fonte: O autor (2019).

- PM 07

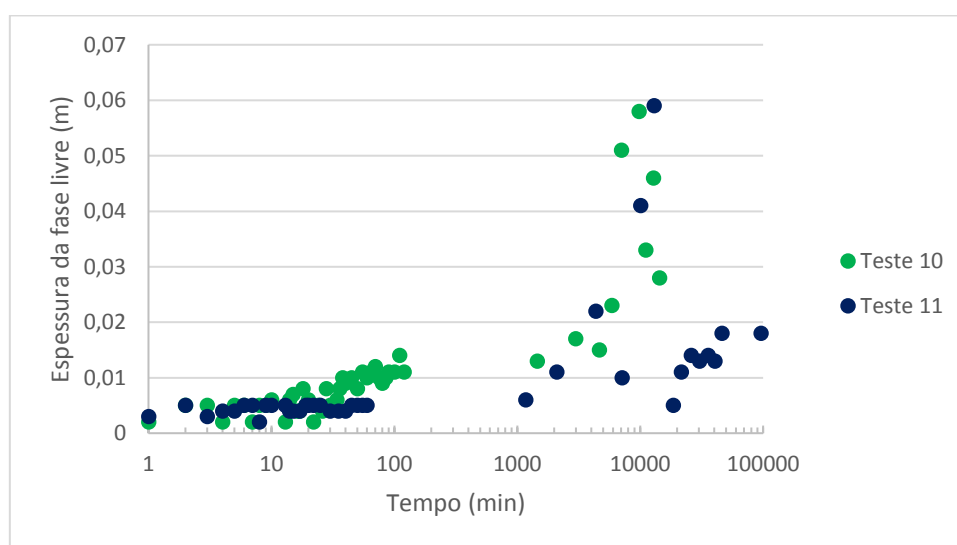
O PM 07 encontra-se em outra pluma de fase livre da Área 3 e as características do LNAPL são distintas da outra pluma, onde se localizam os poços anteriores. Nessa área o solo apresenta-se mais compactado que no local onde estão os PM 22 e SBF 03.

A variação de NA e NO nos testes realizados nesse poço não apresentaram o comportamento característico esperado. Nesse caso houve um aumento do NO e NA nos tempos iniciais e uma queda em períodos posteriores (Anexo 6). A recuperação de

fase livre foi similar nos dois testes (Teste 10, fase livre inicial de 0,620 m e Teste 11, fase livre inicial de 0,069 m), sendo ligeiramente mais rápida no primeiro teste (Figura 14). No segundo teste, a recuperação foi praticamente nula até 1000 minutos e apresentou oscilações posteriormente.

As variações abruptas do NA e NO e, conseqüentemente, da espessura de NAPL nesse poço, podem estar relacionadas à influência das chuvas durante os monitoramentos. Este poço apresentava um NA próximo da superfície (< 2 m de profundidade) e, por isso, sofreu maior influência no fluxo do LNAPL devido à infiltração das chuvas.

Figura 14: Recuperação da fase livre em PM 07 da Área 3 dada pela variação de sua espessura em função do tempo de monitoramento.



Fonte: O autor (2019).

#### 5.1.4 Área 4

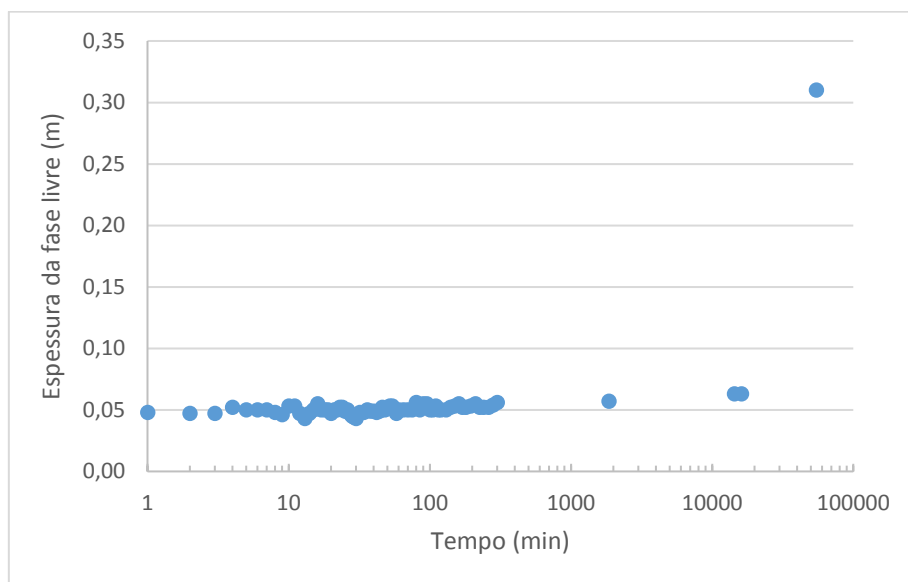
Na Área 4 realizou-se um único teste (Teste 12, fase livre inicial de 1,014 m) no PM 13, onde se verificou uma das maiores espessuras de LNAPL desse estudo. O Teste 12, foi realizado em 01/07/2017 e teve duração de aproximadamente 38 (Figura 15).

No início do teste foi observado um aumento inesperado do NA e NO (até 300 min), seguido de um decréscimo nos dois níveis (Anexo 7).

Esse PM, possuía como condição inicial, uma fase livre inicial superior a 1 metro e demonstrou baixa recuperação durante o teste (Figura 15). Até o tempo de 1860 min, a espessura da fase livre apresentou um acréscimo de apenas 9 mm da condição inicial e, em aproximadamente 11 dias, a espessura havia aumentando somente 1,5 cm.

Somente próximo a 38 dias, a recuperação da espessura apresentou valor maior (31 cm). Observou-se, durante os trabalhos de campo, que o poço não permitia a passagem do *bailer*, podendo ter sido obstruído durante a sua construção ou ter sido danificado em função do fluxo constante de veículos pesados.

Figura 15: Recuperação da fase livre PM 13 da Área 4 dada pela variação de sua espessura em função do tempo de monitoramento.



Fonte: O autor (2019).

## 5.2 Caracterização do LNAPL

As análises de caracterização física dos LNAPLs coletados nas áreas apresentaram poucas variações quanto às densidades, apresentando valores que variaram de 0,81 a 0,86 g mL<sup>-1</sup>. Quanto à viscosidade relativa, esta propriedade variou de 3,40 a 16,33, sendo que o LNAPL caracterizado como óleo de motor apresentou os maiores valores.

Os dados de densidade e viscosidade relativa dos produtos coletados nas áreas de estudo encontram-se na Tabela 5.

Tabela 5: Resultados da caracterização dos produtos

Área - PM -Teste	Densidade (g mL <sup>-1</sup> )	Viscosidade Relativa
Área 1 – PM Ribeirão Pires	0,86	6,59
Área 2 – PM 02 – Teste 1	0,83	3,60
Área 2 – PM 02 – Teste 2	0,84	3,66
Área 2 – PM 02 – Teste 3	0,81	3,50
Área 2 – PM 17	0,84	3,40
Área 3 – PM 07 – Teste 1	0,83	16,33
Área 3 – PM 07 – Teste 2	0,85	10,60
Área 3 – PM 22 – Teste 1	0,82	7,31
Área 3 – PM 22 – Teste 2	0,85	5,17
Área 3 – PM SBF 03 – Teste 1	0,84	7,90
Área 3 – PM SBF 03 – Teste 2	0,84	5,41
Área 4 – PM 13	0,83	3,40

Fonte: O autor (2019).

- Área 1

Quanto às características do LNAPL coletado na Área 1, observou-se que o produto possui coloração amarelada e odor característico de gasolina (Figura 16).

*Figura 16: Amostras de LNAPL encontradas Área 1.*



Fonte: O autor (2019).

- Área 2 - PM 02

Quanto às características do LNAPL coletado no PM02 da Área 2, observou-se que o produto possui coloração alaranjada e odor característico de óleo diesel, e essa característica se manteve durante o segundo teste. No entanto, no terceiro e último teste realizado nesse PM (cujo intervalo ao teste anterior foi de aproximadamente 120 dias) foi observada alteração no aspecto do produto, que passou a apresentar uma coloração mais clara (Figura 17). Porém a densidade e viscosidade do LNAPL não apresentaram mudanças significativas.

Figura 17: Aspecto das amostras de LNAPL coletadas no PM 02 na Área 2 no primeiro (alaranjado) e terceiro (amarelado) testes.



Fonte: O autor (2019).

- Área 02 - PM 17

Nesse poço o produto amostrado apresentou coloração escura, bem distinta da amostra coletada no PM 02, apesar de ambos os poços se encontrarem na mesma área. Após um intervalo de aproximadamente 15 dias essa amostra apresentou alteração em sua característica: o produto se dividiu em duas fases, apresentando sólidos em suspensão com coloração escura e outra em coloração amarelada (Figura 18). No entanto, os valores encontrados no teste de caracterização das propriedades do LNAPL não apresentaram diferenças dos resultados de PM 02.



Figura 18: Amostras de LNAPL coletadas no PM 17 na área 2.



Fonte: O autor (2019).

- Área 03 - PM 22

As amostras de LNAPL coletadas no PM 22 da Área 3 apresentaram coloração preta e odor característico de óleo diesel. Entre as diferentes campanhas realizadas na área, foram observadas alterações nos valores da densidade e viscosidade relativa do produto. Houve um aumento no valor de densidade e um decréscimo na viscosidade. Esta alteração pode estar ligada ao tempo ao qual o LNAPL contido no PM esteve mais exposto às condições superficiais (permaneceu em contato direto com a atmosfera). Este tempo foi maior na primeira campanha, portanto, sujeitando alguns compostos às reações de oxidação e degradação que podem ter alterado a viscosidade do produto.

- Área 03 - PM SBF 03

As amostras avaliadas nesse poço apresentaram as mesmas características do PM 22 quanto à coloração e odor do produto, assim como a alteração nos valores de viscosidade entre as amostras do mesmo poço. Este comportamento era esperado uma vez que os dois poços se encontram inseridos na mesma fase livre. A coloração do produto coletado nesse poço, por sua vez, era preta (Figura 19).

Figura 19: Amostra de LNAPL coletada no PM SBF 03 da Área 03.



Fonte: O autor (2019).

- Área 03 - PM 07

As amostras desse poço foram as que apresentaram os maiores valores de viscosidade (Tabela 4). Quando comparado com os valores das amostras dos testes 1 e 2, verifica-se uma redução de aproximadamente 35% da viscosidade na segunda amostragem. Esse comportamento foi o mesmo em todas as amostras coletadas na área, o que corrobora com a hipótese de que a alteração nesse parâmetro pode estar relacionada ao tempo de exposição da amostra a condições atmosféricas, que promove a oxidação e degradação de alguns compostos, alterando assim essa propriedade.

Quanto ao aspecto visual, a amostra contida nesse PM, apresentou coloração escura e forte odor de óleo de motor, e viscosidade mais elevada dentre os LNAPLs analisados (Figura 20).

Figura 20: Amostra de LNAPL coletado no PM 07 na Área 03.



Fonte: O autor (2019).

- Área 04 - PM 13

As amostras coletadas nesse PM apresentaram coloração escura e odor característico de óleo diesel (Figura 21). Nessa área foi realizada somente uma amostragem, não sendo assim possível confrontar a amostras do mesmo ponto. Ao avaliar os valores das características físicas do LNAPL com os de outras áreas, não houve variação significativa.

Figura 21: Amostra de LNAPL coletada no PM 13 na Área 04.



Fonte: O autor (2019).

### 5.3 Quantificação da transmissividade do NAPL

Os dados obtidos nos testes de *baildown* realizados nas 4 áreas de estudo foram analisados por meio dos modelos de Bouwer & Rice (1976) e Cooper & Jacob (1946). Em apenas quatro testes o resultado da transmissividade foi superior a zero e, em três deles, não pôde ser calculado (Tabela 6).

Tabela 6: Resultados dos cálculos dos testes de transmissividade.

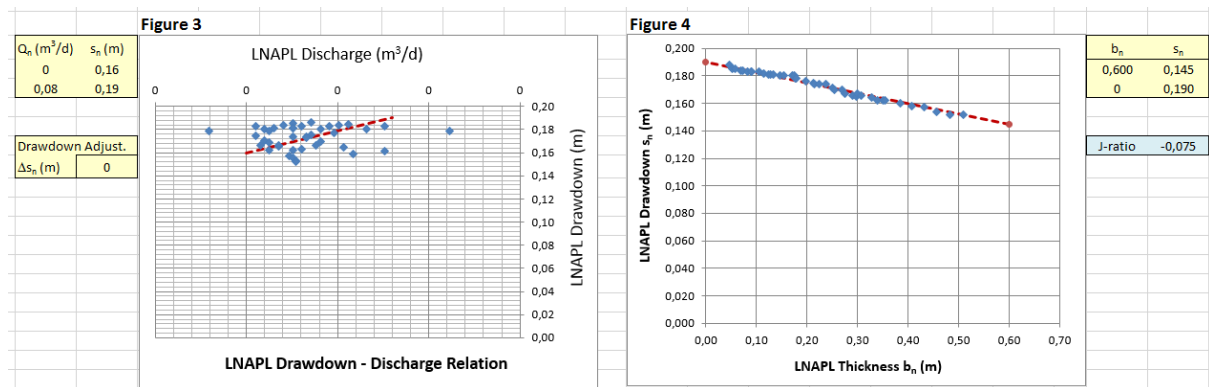
Área de estudo	PM -Teste	Transmissividade (m <sup>2</sup> d <sup>-1</sup> )		
		Bouwer & Rice	Cooper & Jacob	Média
Área 1	PM	*	*	*
Área 2	PM 02 – Teste 1	*	*	*
	PM 02 – Teste 2	0	0	0
	PM 02 – Teste 3	0	0	0
	PM 17	0	0	0
Área 3	PM 07 – Teste 1	*	0	*
	PM 07 – Teste 2	0	0	0
	PM 22 – Teste 1	0,08	0,07	0,075
	PM 22 – Teste 2	0,122	0,086	0,104
	PM SBF 03 – Teste 1	0,003	0	0,0015
	PM SBF 03 – Teste 2	0,005	0,008	0,0065
Área 4	PM 11	0	0	0

\* Não foi possível calcular.

Fonte: O autor (2019).

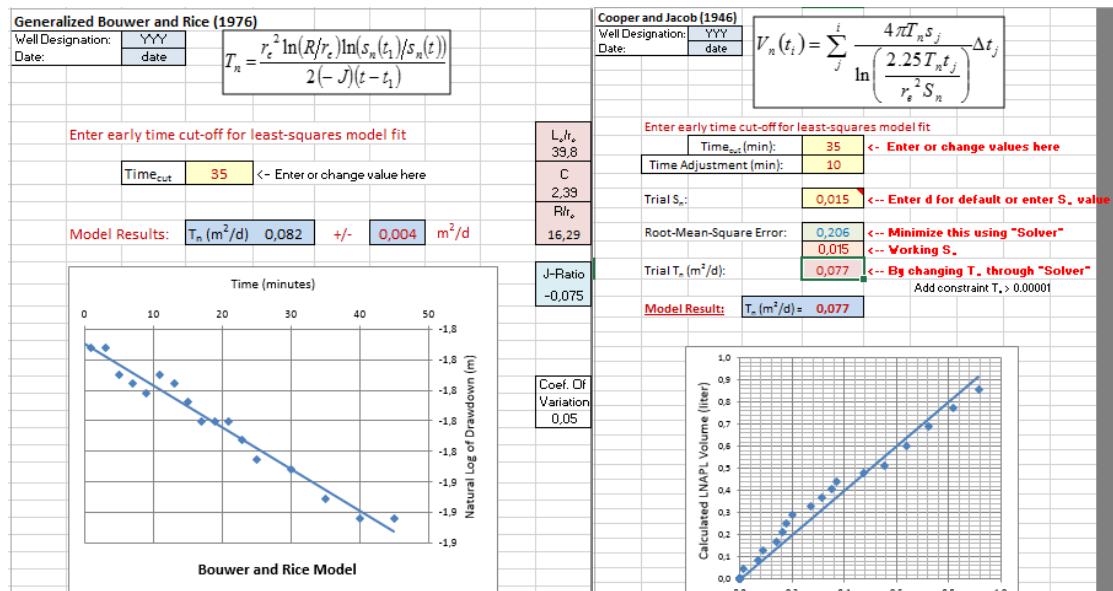
Uma vez alimentadas as tabelas com os dados dos testes de *baildown*, a planilha fornecidas pela API (2012) fornece gráficos com os valores do monitoramento. Para que possa ser encontrada a Tn, faz-se necessário um ajuste das retas para os cálculos. O ajuste ocorre através da inserção de valores de Rebaixamento de LNAPL, Espessura do LNAPL e Vazão. Esses valores são arbitrados até que o modelo represente o comportamento dos dados reais de monitoramento. Esses valores são inseridos em células de coloração amarela conforme pode ser visto nas figuras 22 e 23.

Figura 22: Ajustes de reta realizados para cálculo de Transmissividade.



Fonte: O autor (2019).

Figura 23: Ajustes de dados para cálculo da Transmissividade.



FONTE: O autor (2019).

Observou-se que o método de Bouwer & Rice e o de Cooper & Jacob permitiram estimar a transmissividade em, respectivamente, nove e dez testes realizados nos poços monitorados nesse estudo. Os valores de  $T_n$  resultantes de cada modelo são próximos, e os valores considerados nesse trabalho foram obtidos através da média dos calculados pelos modelos.

## 6 DISCUSSÃO

Em relação ao uso da  $T_n$  como um parâmetro para o gerenciamento de áreas contaminadas, a primeira dificuldade observada é que em alguns casos não foi possível a quantificação da  $T_n$ , devido a comportamentos distintos do esperado por duas razões observadas, a primeira é a ocorrência de níveis não estáticos previamente à realização do teste, e a segunda está relacionada às condições do teste e dificuldades com os procedimentos de campo (Figura 24).

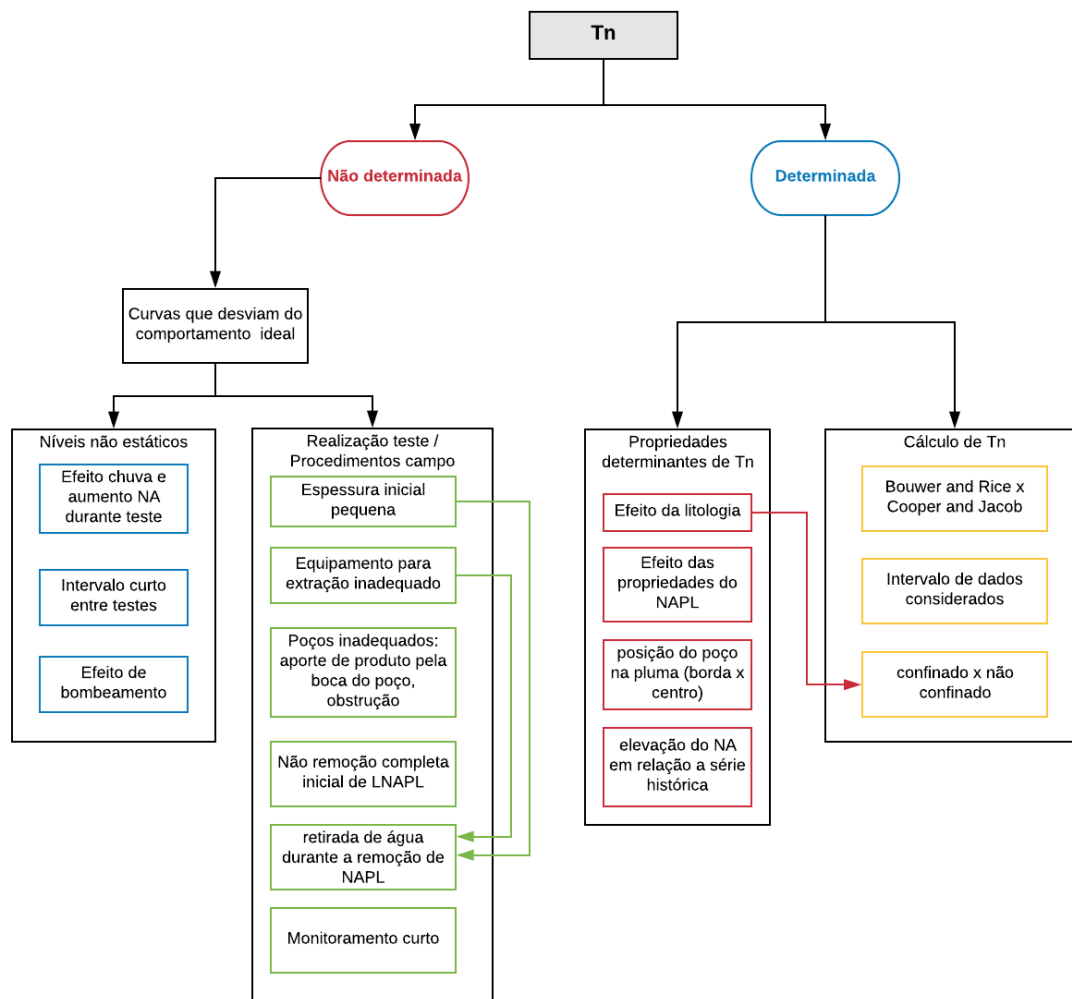
Nos testes nos quais foi possível quantificar a  $T_n$ , no geral, os valores obtidos foram baixos. No Brasil ainda não existem muitos dados de  $T_n$  para serem comparados com os desse estudo, sendo assim os resultados obtidos nos testes realizados nas 4 áreas de estudo serão comparados com os valores de referência do ITRC (2009).

De acordo com os dados do ITRC (2009), valores de transmissividade menores que  $0,0093 \text{ m}^2 \text{ d}^{-1}$  indicam baixa taxa de recuperação de LNAPL por sistemas de bombeamento. Valores de  $T_n$  menores que  $0,0014 \text{ m}^2 \text{ d}^{-1}$  também representam a não recuperação de LNAPL e pouco risco de migração (BECKETT & LUNDEGARD, 1997).

Portanto, de acordo com os valores de  $T_n$  obtidos nesse estudo, pode-se concluir que a técnica de remoção por bombeamento só seria eficiente na Área 3, onde está instalado o PM 22. Nas demais áreas, segundo os valores de  $T_n$  estimados, deveriam ser adotadas outras estratégias de remediação.

Baseado nos testes onde foi quantificado o valor de  $T_n$ , é possível identificar as principais variáveis que interferiram no seu valor, como as características litológicas da área (relacionadas à textura) e propriedades do NAPL, entre outras. Também é possível fazer considerações sobre o método de análise dos dados e quantificação de  $T_n$ . A interferência das principais variáveis e/ou condições e considerações sobre os testes de transmissividade estão esquematizadas na Figura 25 e serão, a seguir, analisadas e discutidas.

Figura 24: Esquema das principais variáveis/condições que influenciaram no cálculo da transmissividade ( $T_n$ ).



FONTE: O autor (2019).

### 6.1 Efeitos dos níveis não estáticos previamente à realização dos testes

A quantificação da  $T_n$  baseia-se no monitoramento da variação dos níveis de água e óleo após uma perturbação, a remoção de NAPL. Inicialmente ocorre uma elevação do NA, que foi observada em todos os testes nos primeiros instantes de monitoramento, decorrente do alívio de pressão causado pela remoção do LNAPL. Para estimar os valores de  $T_n$ , os dados de monitoramento iniciais, após a remoção do NAPL, são inseridos no modelo, porém esses valores são desconsiderados para estimar os valores de  $T_n$ , diminuindo o efeito da drenagem do filtro (geralmente mais poroso que o meio). Assim, o método para quantificação de  $T_n$  tem como hipótese que os níveis iniciais de fluido estão estáticos, em equilíbrio com as condições do meio poroso (ASTM, 2013).

No entanto, verificou-se em muitos casos uma dificuldade em garantir a estabilidade dos níveis.

Esse efeito foi intenso na área com lençol freático mais raso e com maior condutividade hidráulica (Área 1). No teste realizado na área com essa condição, observou-se uma maior instabilidade no NA, que apresentou também uma elevação contínua ao longo do teste de  $T_n$ , sendo essa flutuação maior durante o período de chuvas. Portanto, em locais com lençóis freáticos mais rasos é indicado que os testes de  $T_n$  ocorram em períodos mais secos, evitando que o NA esteja sujeito a variações por efeito das precipitações.

Também foi verificado que, caso ocorra a necessidade de avaliação no mesmo poço, o intervalo entre as campanhas seja em intervalo de tempo suficiente para que os níveis dos fluidos atinjam o equilíbrio. Em alguns casos, como na Área 2/PM2/Teste 3 e Área 3/PM7/Teste 2, o intervalo de tempo entre os testes pode ter afetado a recuperação do volume original da fase livre. Observou-se que nos testes realizados antes do intervalo de tempo de estabilização, os resultados obtidos nos cálculos de  $T_n$  foram nulos.

Outra condição observada no teste na Área 2 que influenciou nos resultados dos testes, refere-se ao gradiente de pressão pneumático gerado pelo sistema de remediação implantado na área. Em todos os testes realizados nessa área de estudo, o período entre o desligamento das bombas e início dos testes não foi suficiente para que houvesse a estabilização dos níveis do LNAPL e do aquífero. Apesar das avaliações durante a caracterização das condições iniciais do poço de monitoramento indicarem níveis estáveis, foi observada a elevação do NA durante o período monitorado, em decorrência do gradiente de pressão pneumático gerado pelo sistema de remediação. Portanto, é necessário acompanhar a variação dos NA e NO por um longo período para evitar que os testes sejam iniciados antes de sua estabilização e influenciem no resultado final de  $T_n$ .

Outro efeito observado foi a conversão da fase livre em fase residual com o desligamento do sistema de bombeamento e consequente elevação do NA, isolando frações de LNAPL nos poros, limitando sua mobilidade.

Ressalta-se que garantir a estabilidade e equilíbrio dos níveis pode ser extremamente complexo em áreas que possuem sistema de remediação ativo ou que estão muito sujeitas à influência de chuva, demandando longo períodos para a estabilização. Além disso, como alguns testes tem duração prolongada, garantir que os níveis não estejam sendo afetados por outros fatores é um desafio.



Esperava-se que durante o monitoramento ocorresse uma elevação do NA inicial, devido ao alívio de pressão exercido pelo LNAPL no poço, seguido por um decréscimo, de acordo com a recuperação do contaminante no poço. No entanto, foi verificado o aumento contínuo no NA, o que pode ter proporcionado o trapeamento de uma parcela da fase livre, transformando-a em fase residual, que teria afetado a mobilidade do LNAPL.

## 6.2 Efeitos dos procedimentos de campo / operacionais

A norma E2856-13 da ASTM (2013) recomenda que em poços de monitoramento com espessuras de LNAPL baixas (menores que 0,152 m de fase livre) não seja utilizada a técnica de *Baildown* para aferir a transmissividade. No entanto, para avaliar as condições específicas encontradas nas áreas estudadas, esse método foi testado mesmo em poços contendo baixa espessura de LNAPL. Em alguns poços analisados (Área 1/PM1; Área 2/PM2/Teste 3; Área 2/PM 17/; Área 3/PM 7/Teste 2) a espessura apresentada era menor que a recomendada.

De fato, nesses poços não foi possível estimar valores de transmissividade; contudo, alguns fatores foram verificados como possíveis responsáveis pelo insucesso do cálculo. Entre esses fatores, podemos destacar a remoção do volume inicial de LNAPL que alterou a pressão no poço de monitoramento, provocando uma elevação constante no NA, durante todo o teste. Esse comportamento é esperado em condições iniciais, porém, foi observado que não houve o retorno do NA para a condição inicial, conforme a recuperação do LNAPL no interior do PM. Somado a esse fato, o pequeno volume de LNAPL dificultou o procedimento de remoção do produto, removendo-se também parte da água que se encontrava junto ao produto. Durante a recuperação dos níveis dos fluídos no poço, observou-se uma maior recuperação de água nos poços, quando comparado ao volume de LNAPL. Esse efeito acabava interferindo nos cálculos de  $T_n$ , resultando em erro com valores negativos de recuperação de LNAPL.

Outro ponto nos procedimentos adotados que influenciaram na dinâmica dos testes foi o tipo de equipamento utilizado. Apesar de relativamente simples, a remoção de LNAPL com o auxílio de *bailer* não foi eficiente por trazer uma parcela de água junto com o produto oleoso, alterando o equilíbrio dinâmico no poço de monitoramento com menores espessuras aparentes de LNAPL. Portanto, esse fato pode ter influenciado nos valores de recuperação dos testes. Outro ponto que merece ser considerado quanto ao uso de *bailer* é o pistoneamento durante a sua inserção e retirada do poço, que deve ser

evitado, pois pode alterar o fluxo natural e o equilíbrio hidrodinâmico - o que acarreta instabilidade e erros no resultado do modelo. Conforme observado no Teste 01 no PM 13 da Área 4, a utilização da bomba peristáltica permitiu uma menor remoção de água durante o procedimento, porém seu uso é limitado pela capacidade de bombeamento do equipamento, não sendo seu uso indicado para testes em poços de monitoramento muito profundos ( $NA > 7m$ ). No entanto, o uso desse equipamento possui a vantagem de não interferir muito no comportamento natural dos fluídos (água e LNAPL).

A localização e o estado de conservação do poço de monitoramento também podem interferir nos valores de transmissividade. Foi observado no trabalho de campo que o poço escolhido para ser monitorado (Poço 17 da Área 2) recebia, periodicamente, aporte superficial de água de lavagem de veículos, contendo óleo e detergente. A entrada dessa parcela de fluido causava a instabilidade na dinâmica do poço, interferindo no monitoramento de NA e NO. Portanto, a variação observada na espessura de LNAPL desse poço não era representativa da fase livre encontrada na área.

Quanto à conservação do poço de monitoramento, verificou-se que pode ter uma influência significativa sobre a  $T_n$ . Em uma das áreas estudadas (Área 3) apesar do poço de monitoramento possuir espessura de LNAPL superior a um metro, a sua recuperação foi baixa. Ao avaliar a construção do poço, notou-se um desalinhamento e bloqueio de partes do poço, o que pode ter gerado uma obstrução ou até mesmo alteração do elemento filtrante, o que acarreta na interrupção do fluxo entre a fase livre e o interior do poço de monitoramento. Este comportamento também pode estar relacionado ao meio poroso, porém essa informação não foi fornecida pela empresa, não sendo possível confirmar essa hipótese.

A duração do tempo de monitoramento para a recuperação do LNAPL também pode afetar os resultados de  $T_n$ . Nesse estudo foram realizados testes com diferentes durações, e os resultados obtidos indicaram que, se não houver uma campanha intensa de monitoramento, os valores de  $T_n$  não podem ser estimados.

De modo geral, o prévio conhecimento sobre o perfil construtivo e as condições dos poços deve ser analisado e avaliado, antes de selecionar os poços a serem monitorados; evitando-se assim, que as condições operacionais mencionadas acima influenciem nos resultados de transmissividade.

### 6.3 Propriedades determinantes de Tn

As principais variáveis que contribuíram para obter valores mais altos de Tn estão relacionadas às características físicas da área (litologia), propriedades do LNAPL, posição dos poços em relação à pluma e à elevação do NA em relação à série histórica.

O conhecimento prévio das características físicas do solo é importante para avaliar as propriedades do meio em que a fase livre se encontra, a fim de avaliar a mobilidade do contaminante. Dentre as áreas analisadas nesse estudo, encontravam sobre aterros as áreas 1,3 e 4, cujas características físicas eram muito distintas das formações originais. Sendo assim, a correlação direta entre propriedades do LNAPL e as características físicas do meio foram avaliados de acordo com as condições existentes. Sendo um aterro, as características locais eram bastante heterogêneas, não sendo possível estender as mesmas condições para todo o terreno.

Considerando essa heterogeneidade, foram observados dentro da mesma fase livre, solos com propriedades distintas em poços de monitoramento próximos. Considerando que as propriedades do LNAPL eram as mesmas, quando possível o tipo de solo onde se encontrava a fase livre foi caracterizada. Nessa análise verificou-se forte influência da textura do solo na determinação de Tn. De forma geral, os valores mais altos de Tn estão associados a áreas com solo arenoso e as mais baixas a solos com textura mais fina.

Essa relação com a textura do solo foi constatada na Área 3 onde, apesar do PM 22 e do PM SBF 03 estarem inseridos na mesma pluma de LNAPL, o PM SBF 03 apresentou valores menores de transmissividade. Considerando que as propriedades do produto (viscosidade, densidade e composição) são praticamente as mesmas, a diferença dos valores de Tn está associada ao meio, visto que no PM SBF 03 o LNAPL está na camada de argila siltosa pouco arenosa e no PM22 em areia média.

A análise das propriedades determinadas nos LNAPLs coletados nas áreas de estudo revelou que todos possuem valores de densidade semelhantes (próximos a  $0,83 \text{ g mL}^{-1}$ ). Quanto à viscosidade relativa, os produtos analisados nas áreas 1 e 3 apresentaram valores mais altos (de 5,4 a 16,3) em relação às áreas 2 e 4 (em torno de 3,5). A diferença dos valores nessa propriedade se justifica pelo tipo de contaminante. Os valores maiores de viscosidade encontrados são de uma mistura de óleo de motor, segundo aspectos vistos em campo e também contidos nos relatórios. Quanto à diferenciação dos valores encontrados nas áreas 2 e 3, para produtos identificados como óleo diesel, essa diferença pode estar relacionada a composição e idade do

produto, visto que a contaminação da Área 3 é originária do tanque de armazenamento de óleo diesel da década de 70, enquanto nas demais áreas a contaminação é mais recente.

A elevada viscosidade relativa do produto pode ter dificultado a sua mobilidade. Nos poços da Área 3, com espessuras de fase livre similares, associados a solos de baixa permeabilidade, os testes no poço PM7 apresentaram valores de transmissividade menores ( $T_n = 0$ ) que no poço PM SBF03. A diferença provavelmente se deve ao fato do produto no poço PM7 possuir uma viscosidade cerca de duas vezes maior.

Também na Área 3, a análise de  $T_n$  em poços localizados em pontos diferentes de uma mesma pluma revelou que a recuperação do LNAPL ocorreu em menor tempo (maior  $T_n$ ) no poço situado no centro da pluma (PM22) em relação àquele localizado na borda (PM SBF03). Além da diferença na litologia, no centro da pluma a espessura de fase livre era maior e a saturação de NAPL no meio poroso também deve ser superior, resultando em maior energia potencial da fase livre em relação ao poço, e maior permeabilidade relativa do NAPL, proporcionando maiores valores de  $T_n$ .

Outro aspecto importante refere-se à posição do lençol freático devido a variações sazonais (como verificado nos testes no PM SBF 03 na Área 3) ou interrupção de sistemas de bombeamento (como observado nos testes no PM02 na Área 2). Para diminuir essa influência nos testes, deve-se buscar uma série histórica de dados pluviométricos, identificando os períodos de estiagem, considerando a realização dos testes nesses períodos, evitando a formação de fase residual pela elevação do lençol freático, obtendo assim valores mais precisos de  $T_n$ . Essa influência da posição do lençol freático foi demonstrada por PEDE (2009) e por GATSIOS et al. (2018).

#### **6.4 Considerações sobre o cálculo de $T_n$**

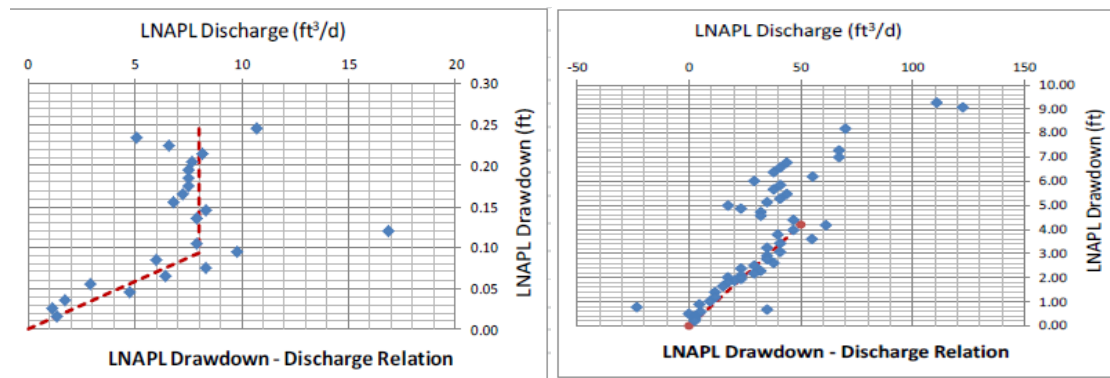
A determinação da  $T_n$  pode ser feita de acordo com os modelos de Bouwer & Rice e Cooper & Jacob (API, 2016). O primeiro é recomendado para purgas mais longas, por não considerar o tempo absoluto do teste realizado, enquanto o segundo é utilizado para eventos rápidos, por incorporar o efeito transitório do armazenamento (API, 2016). Contudo, os resultados de  $T_n$  obtidos pelos dois modelos não variaram muito. O coeficiente de correlação ( $R^2$ ) dos resultados obtido pelos dois métodos foi de 0,984, sendo que o modelo de B&R apresentou valores um pouco maiores em relação ao modelo de C&J.

Conforme a norma (ASTM, 2013), os testes devem ser monitorados no mínimo até se atingir 75% da condição inicial dos níveis dos fluídos para se obter o resultado de  $T_n$ . Para avaliar a importância de se atingir essa recuperação na quantificação de  $T_n$ , o cálculo da transmissividade no PM SBF03 da Área 3 foi refeito utilizando-se somente os dados dos primeiros 180 minutos iniciais do Teste 1, quando a recuperação era aproximadamente 20%. Foi obtido o valor de  $0,003 \text{ m}^2 \text{ d}^{-1}$  pelo método Bouwer & Rice. Com os dados completos (obtidos em 14428 minutos, aproximadamente 10 dias) e através do mesmo método (Bouwer & Rice), o valor resultante de  $T_n$  foi de  $0 \text{ m}^2 \text{ d}^{-1}$ . Assim sendo, verifica-se que em áreas onde a transmissividade apresenta valores baixos, o monitoramento possivelmente pode ser interrompido, sem que seja atingida a recuperação de 75% do valor inicial da fase livre.

Para a quantificação de  $T_n$ , um aspecto importante a ser avaliado se refere à forma como a fase livre se encontra no meio, ou seja, se está confinada ou não. Esta condição é importante para avaliar a escolha do modelo utilizado na determinação de  $T_n$ . Esta avaliação pode ser feita com base na litologia e dados da distribuição de LNAPL na área, e através da visualização da representação gráfica da descarga *versus* rebaixamento do LNAPL, onde nas condições de confinamento ou LNAPL suspenso, existe um agrupamento nos dados iniciais, acompanhado de uma dispersão dos valores ao longo do período avaliado.

Todas as áreas avaliadas nesse trabalho que apresentaram valores de  $T_n$  de LNAPLs  $> 0$  consideraram, inicialmente, que a condição em que a fase livre se encontrava era a não confinada. Ao avaliar o gráfico de descarga *versus* rebaixamento do LNAPL, foi visto que o comportamento não representava condição de LNAPL confinado. No entanto, considerou-se a possibilidade de que o PM 07 da Área 03 apresentasse uma condição próxima da de confinamento – considerando que nessas áreas a formação original foi alterada por aterro argiloso e trânsito elevado de veículos pesados, resultando em uma diminuição da permeabilidade nas camadas superficiais. Dentro dessa hipótese, poços de monitoramento atuariam como um sistema de alívio de pressão, o que justificaria valores de espessura aparente elevada de LNAPL e a baixa recuperação dos poços durante os testes. Foi também avaliada a estimativa de  $T_n$ , considerando a condição confinada e livre, os resultados obtidos se mostraram distintos, porém, conforme mencionado, o LNAPL não apresenta condição de confinamento, conforme o exemplo característico apresentado por API, 2016. O comportamento de áreas consideradas confinadas e não confinadas encontra-se na figura 25.

Figura 25: comportamento de descarga em condições confinadas e livre respectivamente, exemplo API (2016).



FONTE: O autor (2019).

De forma geral, observou-se que o modelo de Cooper & Jacob apresentou valores de  $T_n$  menores que o modelo de Bouwer & Rice. Esse resultado pode estar ligado ao fato de que o modelo compara os valores de descarga avaliados em campo com aqueles obtidos através do algoritmo, ou seja, considera todo o período amostrado, enquanto no de Bouwer & Rice a  $T_n$  é conseguida através do ajuste de reta, onde somente os maiores valores de descarga são considerados, e os inferiores, desconsiderados.

## 7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Os resultados desse trabalho permitiram verificar que, apesar dos procedimentos dos testes de transmissividade serem relativamente simples, demandam planejamento e avaliação prévia das variáveis que podem influenciar nos resultados.

Alguns testes foram realizados em condições não ideais, como por exemplo com instabilidade dos fluídos decorrente de operação de bombeamento e com baixo volume de LNAPL nas condições iniciais. Dificuldades eram esperadas nesses cenários, porém os testes foram realizados para avaliar e quantificar o impacto dessas condições na determinação de  $T_n$ .

As principais variáveis identificadas nesse trabalho que podem influenciar na determinação da  $T_n$  são a viscosidade, o substrato onde o LNAPL encontra-se depositado, a saturação do LNAPL, a localização do poço de monitoramento na pluma de fase livre e a flutuação do nível do lençol freático.

Os testes de  $T_n$  devem ser realizados em períodos de baixa precipitação pluviométrica e sob condições de nível de água mais baixo, evitando-se que ocorra a formação de fase residual. Os poços selecionados para a realização do teste devem levar em consideração a sua integridade, descrição do perfil construtivo (litologia associada) e posição dentro da fase livre.

Foi verificado que a estabilidade dos níveis dos fluídos é fundamental para que seja possível quantificar a  $T_n$ . Assim, nas áreas com sistema de remediação por bombeamento implantado, deve ser realizado o seu desligamento e o monitoramento dos níveis dos fluídos, até se atingir a sua estabilidade, evitando-se, assim, interferências por gradientes pneumáticos, gerados por esse sistema. Por esse motivo também se ressalta a orientação de se realizar testes em períodos com menor incidência de chuvas.

Verificou-se forte influência das características litológicas nos resultados de  $T_n$ . Portanto, ressalta-se a importância de se realizar um levantamento mais completo e cuidadoso das características físicas do perfil do solo da área de estudo.

A compactação do solo causada pelo trânsito de veículos pesados também pode ter influenciado na mobilidade do NAPL. Em solos com textura argilosa esse fenômeno pode ter um papel mais significativo, por diminuir a permeabilidade do meio. Portanto a indicação posterior de estudos relacionados a índice de compactidade do solo é recomendável.

Recomenda-se também que estudos pilotos para avaliar a Tn em solos heterogêneos e em aterros sejam previamente realizados a fim de quantificar a saturação de NAPL e água ao longo do perfil do solo, assim como as suas propriedades físicas nos diferentes horizontes.

Conforme já mencionado, os PMs utilizados nesse estudo já eram pré-existentes e informações sobre o perfil construtivo e litologia foram fornecidos pelas empresas, muitas vezes sem o nível de detalhamento sobre a texturas dos solos dessas áreas. Porém como foi constatada a relevância dessas informações, recomenda-se que sejam instalados poços para a realização do teste com o detalhamento dessas informações. Onde esses PMs poderiam ser utilizados para o monitoramento de Tn durante as etapas de remediação, sugere-se que a instalação dos poços para os testes de Tn, ocorram na etapa da Investigação Detalhada, onde naturalmente as ações de levantamento dos dados hidrogeológicos da área são realizados de maneira mais efetiva.

Assim, considera-se que a Tn é um parâmetro que pode ser utilizado no gerenciamento de áreas contaminadas, desde que as variáveis envolvidas sejam adequadamente conhecidas e consideradas na formulação de diretrizes para a sua aplicação.



## REFERÊNCIAS

- ANP. Agência Nacional do Petróleo e Gás Natural e Biocombustíveis. Óleo Diesel. 2017.
- ANP. Agência Nacional do Petróleo e Gás Natural e Biocombustíveis. Gasolina. 2016.
- ANP a. Agência Nacional do Petróleo e Gás Natural e Biocombustíveis. Biocombustíveis. 2016.
- API. Soil and Groundwater Research Bulletin Number 18, American Petroleum Institute. 2003.
- ASTM International. Standard guide for estimation of lnapi transmissivity, ASTM E 2856-13. West Conshohocken, Pennsylvania: ASTM. 2013.
- BEAR, J. Dynamics of Fluids in Porous Media. American Elsevier Publishing Company, New York, 764 p. 1974.
- BECKETT, G.D. & HUNTLEY, D. LNAPL Transmissivity: A Twisted Parameter. Ground Water Monitoring and Remediation. 2015.
- BECKETT, G.D. & LUNDEGARD, P.D. Practically Impractical - The Limits of LNAPL Recovery and Relationship to Risk. Conference Proceedings of the 1997 Petroleum Hydrocarbons & Organic Chemicals in Ground Water. Houston Texas, sponsored by the National Ground Water Association & American Petroleum Institute. 1997.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. CONAMA nº 420. Resolução nº 420, de 28 de dezembro de 2009.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Áreas Contaminadas. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/cidades-sustentaveis/residuos-perigosos/areas-contaminadas.html>>. Acesso em outubro 2018.
- CHARBENEAU, R. J.; KIRKMAN, A.; MUTHU, R. User guide for API LNAPL transmissivity workbook: A tool for baildown test analysis American Petroleum Institute Regulatory and Scientific Affairs Department 1220 L St, Washington DC 20005. 2012.
- CHARBENEAU, R.J., JOHNS, R.T., LAKE, L.W., MCADAMS III, M.J. Free-Product recovery of petroleum hydrocarbon liquids. Groundwater Monit. Remediation 20, 147–158. 2000.
- CLEARY, R.W. Águas Subterrâneas. Princeton Groundwater, Inc. 2007.
- CPRM (2006). Mapa Geológico do Estado de São Paulo. Serviço Geológico do Brasil – CPRM. Disponível em: <<http://www.cprm.gov.br/>>. Acesso em: Dezembro de 2019.
- CURCIO, G.R; LIMA, V.C e GIAROLA, N.F.B. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. Antropossolos: Proposta de Ordem (1ª Aproximação). Colombo: EMBRAPA Florestas, 2004. Disponível em: <<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/311308/1/doc101.pdf>>. Acesso em: mar, 2019.
- DE MORAES, S.L. TEIXEIRA, C.E., MAXIMIANO, A. M. de S. Guia de elaboração de planos de intervenção para o gerenciamento de áreas contaminadas. IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. São Paulo. 2014.
- FEITOSA ACF, FILHO JM, FEITOSA EC, DEMETRIO JGA. Hidrogeologia – conceitos e aplicações, Serviço Geológico do Brasil (CPRM), 3. Ed. Ver. E ampl. – Rio de Janeiro: CPRM : Laboratório de Hidrogeologia (LABHID), 2008.

- FITTS, C.R. Águas Subterrâneas. 2º ed. Elsevier – Campus. 2015.
- FREEZE, R.A., and Cherry, J.A., Groundwater: Englewood Cliffs, NJ, Prentice-Hall. 1979.
- GATSIOS, E., RINCON, J.G., RAYNER, J.L., MCLAUGHLAN, R.G., DAVIS, G.B. LNAPL transmissivity as a remediation metric in complex sites under water table fluctuations. *Journal of Environmental Management* 215 (2018) 40 e 48.
- GOMES, N.F., ELIAS C. G. R. , DE CAMARGOS W. B. Remediação passiva de compostos menos densos que a água como alternativa sustentável para projetos de remediação *IV Congresso Internacional de Meio Ambiente Subterrâneo. 2016.*
- GROHMANN, F. Boletim Técnico do Instituto Agrônomo do Estado de São Paulo. Vol 19. Nº 21. Campinas. 1960.
- GÜNTHER, W. M. R. Áreas contaminadas no contexto da gestão urbana. São Paulo em Perspectiva, v. 20, n. 2, p. 105-117, abr./jun. 2006.
- HABERMANN, M; GOUVEIA, N. Requalificação urbana em áreas contaminadas na cidade de São Paulo. *Estudos Avançados* 28 (82), 2014.
- HASUI, Y.; SADOWSKI, G.R. Evolução geológica do pré-cambriano na região do Estado de São Paulo. *Revista Brasileira de Geociências*, v.6, n.3, p.182-200, 1976.
- HAWTHORNE J.M., KIRKMAN, A. Demystifying NAPL Science for the Remediation Manager. Vol 1. 2011.
- HUNTLEY, D. Analytic Determination of Hydrocarbon Transmissivity from Baildown Testes. *Ground Water*. 1999.
- HUNTLEY, D. & BECKETT, G.D.. Persistence of LNAPL sources: Relationship Between Risk Reduction And LNAPL Recovery. *Journal of Contaminant Hydrology*, in press. 2002.
- INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS – IPT. Parecer Técnico nº 7.703/00. Assessoria técnica para a regularização da atividade minerária na Estância Turística de Ribeirão Pires. São Paulo. 2000.
- INTERSTATE TECHNOLOGY & REGULATORY COUNCIL - ITRC. Evaluating LNAPL Remedial Technologies for Achieving Project Goals. 2009.
- INTERSTATE TECHNOLOGY & REGULATORY COUNCIL – ITRC. Light Non-Aqueous Phase Liquid (LNAPL) Site Management: LCSM Evolution, Decision Process, and Remedial Technologies. LNAPL-3. Washington, D.C. 2018.
- KIMBALL, C.G., HAWTHORNE, J.M, MENATTI, J.A., ROUSSEAU, M. J. GHD. Light Non-Aqueous Phase Liquid Transmissivity (Tn) Acceptance and use by the Regulatory Community. The University of Tulsa. Tulsa, 2018.
- LENHARD, R.J., PARKER J.C. Estimation of free hydrocarbon volume from fluid levels in monitoring wells, *Ground Water*, 28(1): 57-67, 1990.
- LOHMAN. S.W. Grounds-Water Hydraulics. Geological Survey Professional. Paper 708. United States Government Printing Office. Washington. 1972.
- LU, N. LIKOS, W.J. Unsaturated Soil Mechanics. New Jersey, USA, Johns Wiley & Sons. 2004.

MAYER, A.S & HASSANIZADEH, M. Soil and Grounwater Contamination: Nonaqueus Phase Luiquids. Water Resources Monograph 17. Copyright 2005 by the American Geophysical Union.

MANTESSO-NETO, V., RIBEIRO, R.R., GARCIA, M.G.M., LAMA,E.A.D., THEODOROVICZ,A. Patrimônio geológico no estado de São Paulo. Boletim Paranaense de Geociências. Volume 70. 53 – 76. 2013.

MANZIONE, R.L. Águas Subterrâneas: Conceitos e Aplicações sob uma Visão Multidisciplinar. Paco Editorial. Jundiaí.2015

NEVES, M.A.,MORALES, N.,BORGES,M. da S., EBERT,H.D. Compartimentação Morfotectônica da Região de Jundiaí (SP). Revista Brasileira de Geociências. 2003.

NEWELL, C.J.; ACREE, S.D.; ROSS, R.R.; HULLING, S.G. Light Nonaqueous Phase Liquids. Ground Water Issue, Environmental Protection Agency, Oklahoma. 1995.

PACIFICORP AND UNION OIL COMPANY OF CALIFORNIA. LNAPL Pilot Scale Study and Recovery Report. Oregon, 2014.

PALMIER, C . DODT, M.ATTEIA,O. Comparison of Oil Transmissivity Methods Using Bail-Down Test Data. Groundwater Monitoring & Remediation. 2016.

PARKER, J.C. ISLAM.M. Inverse modeling to estimate LNAPL plume release timing. Journal of Contaminant Hydrology 45 (2000) 303–327

PEDE, M. A. Z. Flutuação do lençol freático e sua implicação na recuperação de hidrocarbonetos: um estudo de caso. Rio Claro. 2009.

PEDRON, F. A; DALMOLIN, R. S. D; AZEVEDO, A. C de; KAMINSKI, J. Solos urbanos. Ciência Rural, Santa Maria, v. 34, n. 6, p. 1647-1653, 2004.

PERLOFF, W. H. BARON, W. Soil Mechanics: Principles and applications. Jonh Wiley & Sons. 1991.

RODRIGUEZ, S.K. Geologia urbana da região metropolitana de São Paulo. 1998. 171 p. Tese (Doutorado). Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. 1998.

SÃO PAULO (Estado) CETESB - Manual de Gerenciamento de Áreas Contaminadas. 1999. Disponível em <http://areascontaminadas.cetesb.sp.gov.br/manual-de-gerenciamento/> Acesso em 25/05/2016.

SÃO PAULO (Estado) CETESB - DECISÃO DE DIRETORIA Nº 103/2007/C/E, Diário Oficial do Estado de São Paulo – Caderno Executivo I (Poder Executivo, Seção I), do dia 27/06/2007. Pag. 34. São Paulo. 2007.

SÃO PAULO (Estado) CETESB – Relação de áreas contaminadas e reabilitadas no estado de são Paulo Dezembro de 2016. Disponível em <http://areascontaminadas.cetesb.sp.gov.br/wp-content/uploads/sites/45/2013/11/Texto-explicativo.pdf> Acesso em 20/09/2017.

SÃO PAULO (Estado) CETESB - DECISÃO DE DIRETORIA Nº 038/2017/C, Diário Oficial do Estado de São Paulo – Caderno Executivo I (Poder Executivo, Seção I), do dia 10/02/2017 Páginas : 47 a 52. 2017.

SIMON, J.A., Editor's Perspective—LNAPL Transmissivity: Mobility Is the New State-of-the-Art Cleanup Metric. Remediation. 2012.

TAYTELBAUM, L.B. Adaptação de um edômetro com controle de sucção para a determinação da curva característica de solos contaminados por óleo diesel. Dissertação Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2008.

TEIXEIRA, C.E., MOTTA, F.G., MORAES, S.L.de. Panorama do setor de gerenciamento de áreas contaminadas no Brasil. IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. São Paulo. 2016.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS. Viscosimetria. Instituto de Química. 2010.

WINEGARDNER, D. L., TESTA S. M. Restoration of Contaminated Aquifers: Petroleum Hydrocarbons and Organic Compounds, Second Edition. 2000.

YOUNG, T. Na Essay on the Cohesion of Fluids. Philos Trans R Soc. Lond 95:65–87. 1805.

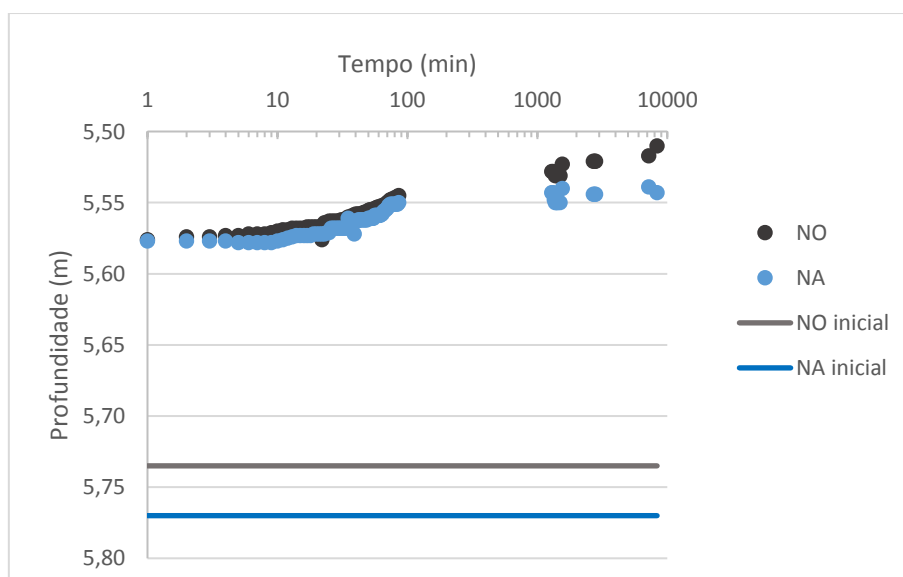
## ANEXOS

### ANEXO 1 - Dados utilizados para avaliação da Tn no Teste 1 e gráfico do comportamento de recuperação do poço durante o teste.

Tabela 7: Dados utilizados para avaliação da Tn no Teste 1

Área	1
PM	
Teste	1
Data	12/12/2016
Duração do Teste (min)	8349
Interface ar/LNAPL (m)	5,735
Interface LNAPL/Água (m)	5,770
Recuperação - Fim do teste (%)	94
Espessura fase livre aparente (m)	0,035
Sist. Remediação Instalado	Sim
Sistema em operação	Não
Chuvas	Sim
Raio do pré filtro (m)	0,017
Raio do Poço (m)	0,025
Rendimento Específico do LNAPL Sy	0,190
Densidade Relativa do LNAPL pr	0,860
Volume de LNAPL removido do pré-filtro	0,2
Raio Efetivo (m)*	0,017
Volume inicial no pré filtro (l)*	0,02
Volume inicial no PM (l)*	0,01
J-ratio*	-2,286

\*Valores obtidos através de cálculos automáticos da planilha fornecida pela API (2012).

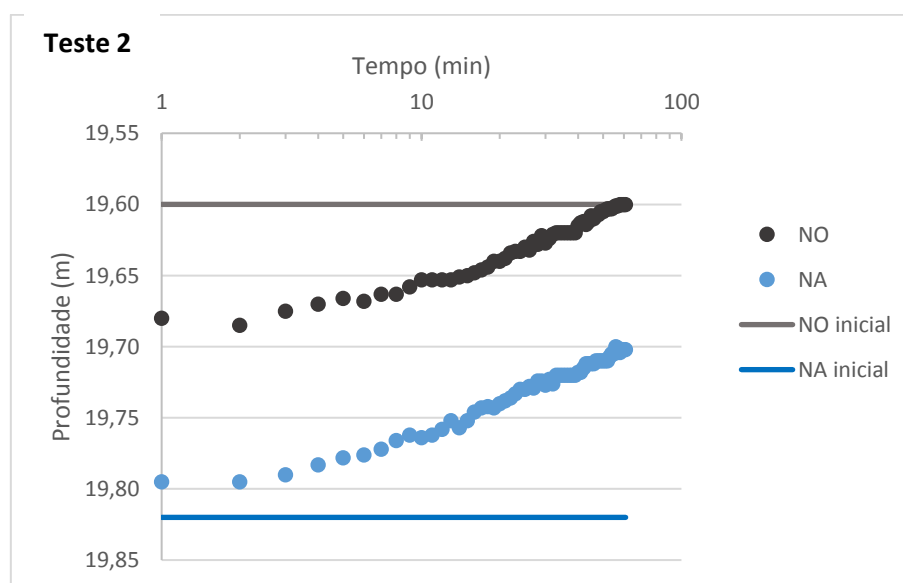


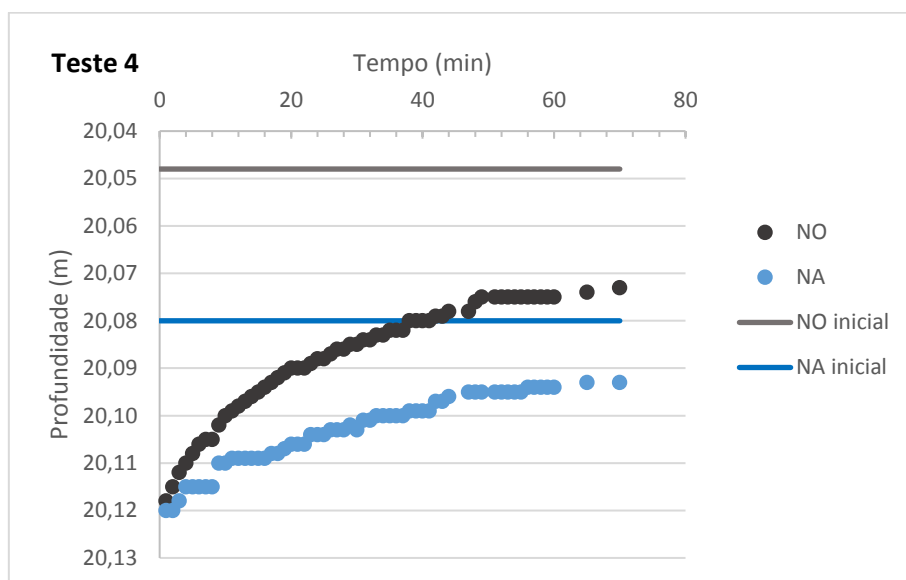
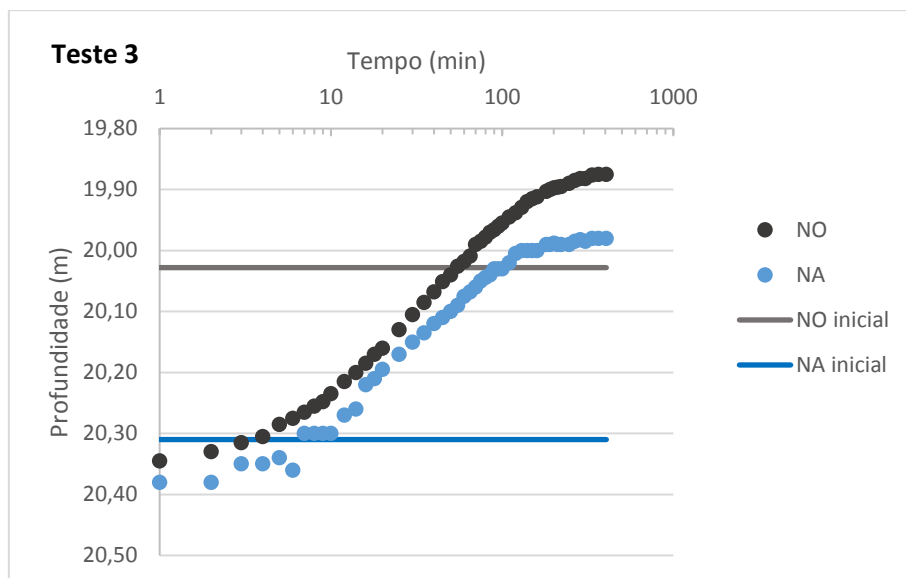
## ANEXO 2 - Dados utilizados para avaliação da Tn no Teste 2, Teste 3 e Teste 4 e gráficos do comportamento de recuperação realizados nos testes.

Tabela 8: Dados utilizados para avaliação da Tn no Teste 2 Teste 3 e Teste 4

Área	2		
PM	02		
Teste	2	3	4
Data	07/10/16	29/10/16	08/02/17
Duração do Teste (min)	61	406	70
Interface ar/LNAPL (m)	19,6	20,028	20,048
Interface LNAPL/Água (m)	18,82	19,73	20,08
Espessura da fase livre aparente (m)	0,22	0,282	0,031
Recuperação - Fim do teste (%)	Não avaliado	37	62,5
Sist. Remediação Instalado	Sim	Sim	Sim
Sistema em operação	Sim	Não	Não
Chuvas	Sim	Sim	Sim
Raio do pré filtro (m)	0,058	0,058	0,058
Raio do Poço (m)	0,025	0,025	0,025
Rendimento Específico do LNAPL Sy	0,175	0,175	0,175
Densidade Relativa do LNAPL pr	0,813	0,813	0,813
Volume de LNAPL removido do pré-filtro	0,7	0,8	0,3
Raio Efetivo (m)*	0,033	0,33	0,031
Volume inicial no pré filtro (l)*	0,33	0,42	0,03
Volume inicial no PM (l)*	0,43	0,57	0,06
J-ratio*	4,50	-2,083	-2,667

\*Valores obtidos através de cálculos automáticos da planilha fornecida pela API (2012).



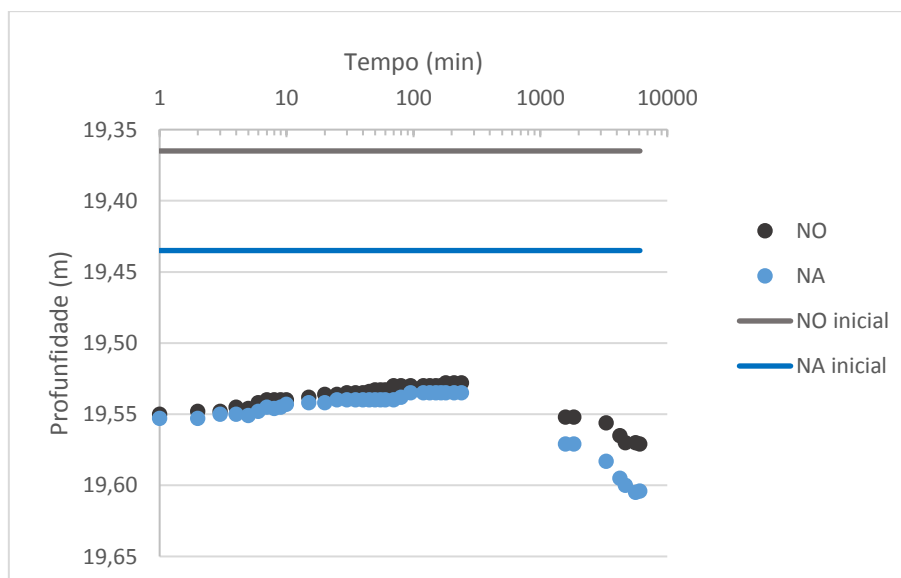


**ANEXO 3: Dados utilizados para avaliação da Tn no Teste 5 e gráfico do comportamento de recuperação.**

Tabela 9: Dados utilizados para avaliação da Tn no Teste 5.

Área	02
PM	17
Teste	5
Data	21/11/2016
Duração do Teste (min)	6090
Interface ar/LNAPL (m)	19,365
Interface LNAPL/Água (m)	19,435
Recuperação - Fim do teste (%)	50
Espessura fase livre aparente (m)	0,07
Sist. Remediação Instalado	Sim
Sistema em operação	Não
Chuvas	Não
Raio do pré filtro (m)	0,058
Raio do Poço (m)	0,025
Rendimento Específico do LNAPL Sy	0,190
Densidade Relativa do LNAPL pr	0,843
Volume de LNAPL removido do pré-filtro	0,2
Raio Efetivo (m)*	0,031
Volume inicial no pré filtro (l)*	0,07
Volume inicial no PM (l)*	0,14
J-ratio*	-2,727

\*Valores obtidos através de cálculos automáticos da planilha fornecida pela API (2012).



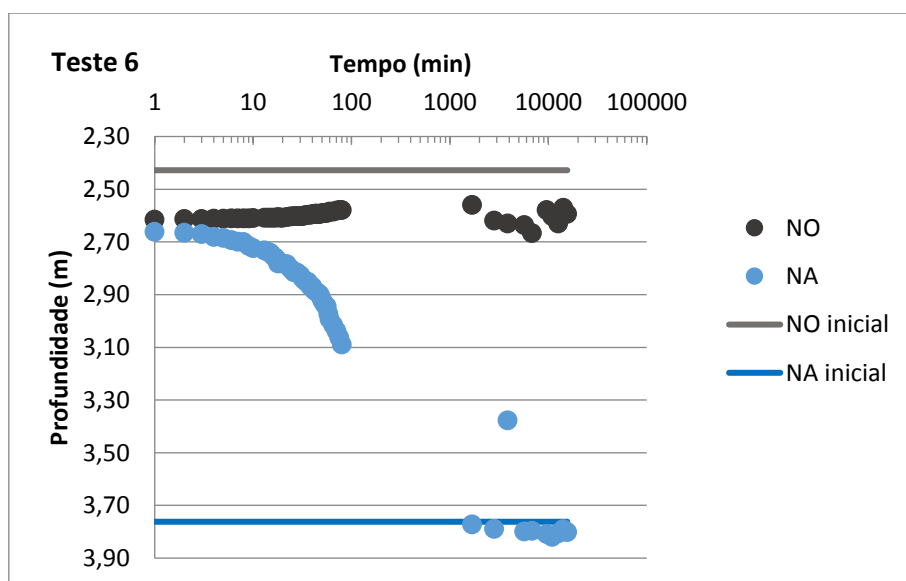


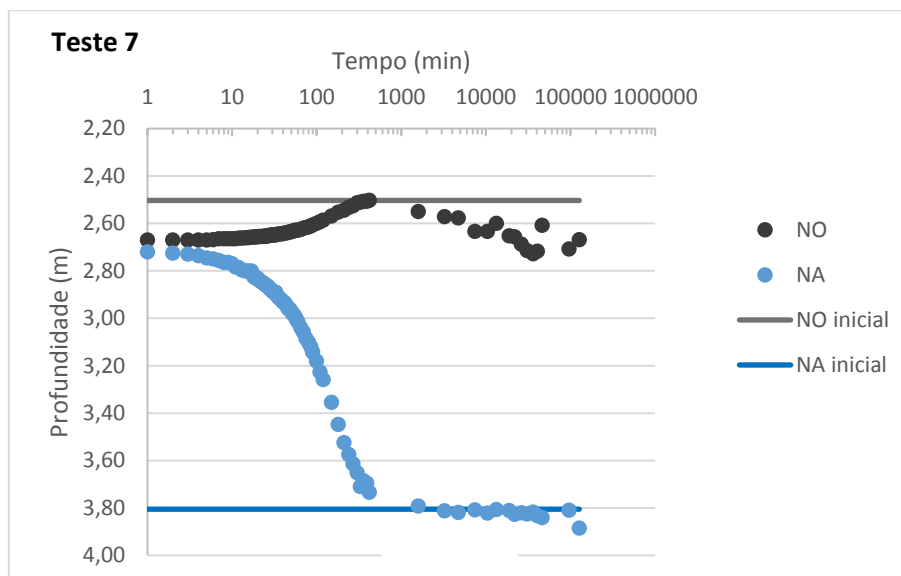
**ANEXO 4: Dados utilizados para avaliação da Tn no Teste 6 e Teste 7, e gráficos do comportamento de recuperação nos testes.**

Tabela 10: Dados utilizados para avaliação da Tn no PM 22 da Área 3

Área	03	
PM	22	
Teste	6	7
Data	12/12/2016	09/03/2017
Duração do Teste (min)	14428	126912
Interface ar/LNAPL (m)	2,428	2,503
Interface LNAPL/Água (m)	3,762	3,805
Recuperação - Fim do teste (%)	92	95
Espessura fase livre aparente (m)	1,334	1,302
Sist. Remediação Instalado	Não	Não
Sistema em operação	Não	Não
Chuvas	Sim	Não
Raio do pré filtro (m)	0,025	0,025
Raio do Poço (m)	0,058	0,058
Rendimento Específico do LNAPL Sy	0,175	0,175
Densidade Relativa do LNAPL pr	0,85	0,85
Volume de LNAPL removido do pré-filtro	4,5	4,1
Raio Efetivo (m)*	0,033	0,033
Volume inicial no pré filtro (l)*	1,99	1,95
Volume inicial no PM (l)*	2,70	2,64
J-ratio*	-0,075	-0,142

\*Valores obtidos através de cálculos automáticos da planilha fornecida pela API (2012).



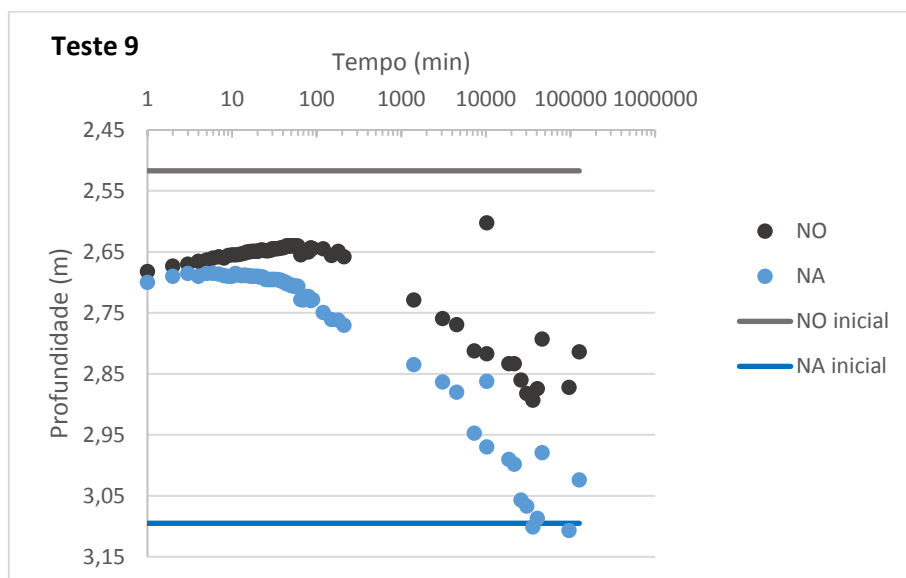
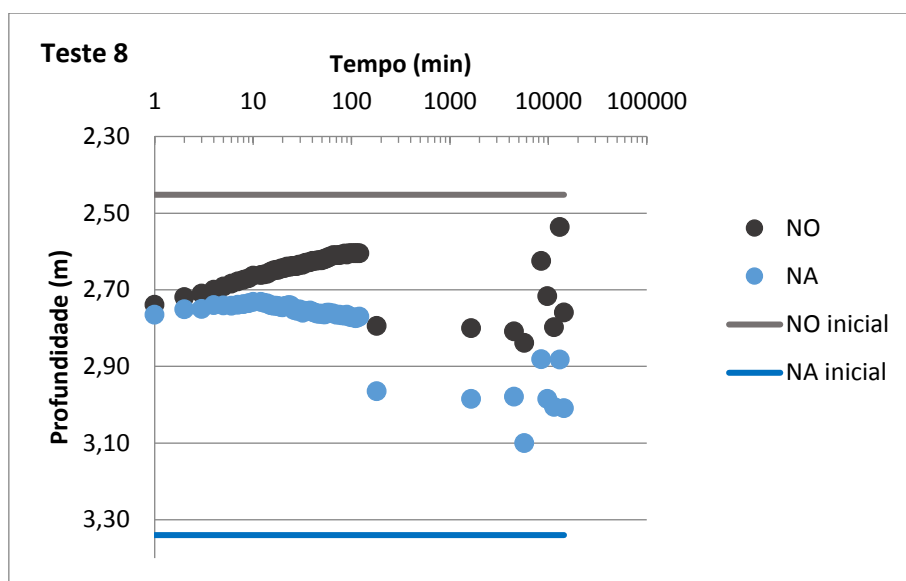


**ANEXO 5 - Dados utilizados para avaliação da Tn no Teste 8 e Teste 9, e gráficos do comportamento de recuperação nos testes.**

Tabela 11: Dados utilizados para avaliação da Tn no PM SBF 03 da Área 3

Área	03	
PM	SBF 03	
Teste	8	9
Data	12/12/2016	09/03/2017
Duração do Teste (min)	15767	126728
Interface ar/LNAPL (m)	2,452	2,517
Interface LNAPL/Água (m)	3,34	3,905
Recuperação - Fim do teste (%)	30	37
Espessura fase livre aparente (m)	0,888	0,578
Sist. Remediação Instalado	Não	Não
Sistema em operação	Não	Não
Chuvas	Sim	Não
Raio do pré filtro (m)	0,025	0,025
Raio do Poço (m)	0,058	0,058
Rendimento Específico do LNAPL Sy	0,175	0,175
Densidade Relativa do LNAPL pr	0,85	0,842
Volume de LNAPL removido do pré-filtro	2,4	1,6
Raio Efetivo (m)*	0,033	0,033
Volume inicial no pré filtro (l)*	1,33	0,86
Volume inicial no PM (l)*	1,80	1,17
J-ratio*	-0,841	0,200

\*Valores obtidos através de cálculos automáticos da planilha fornecida pela API (2012).

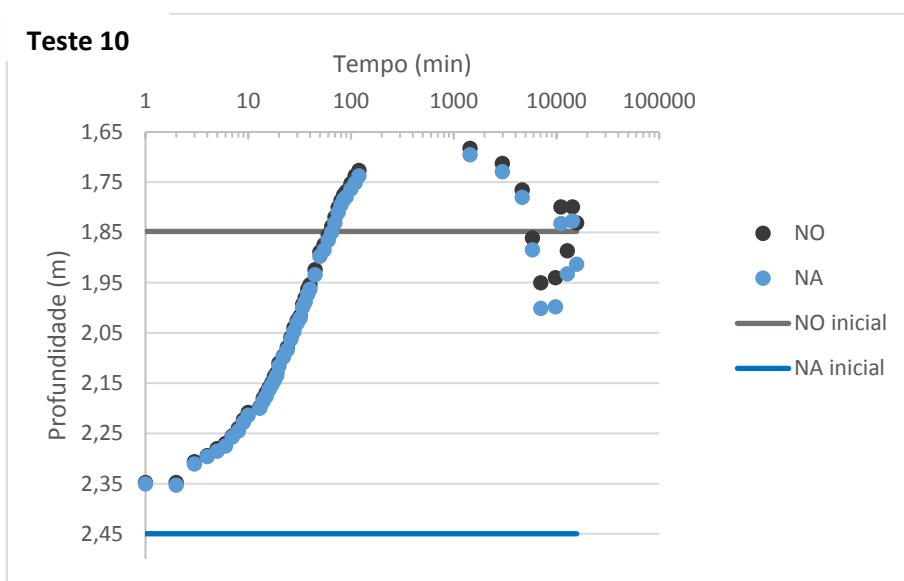


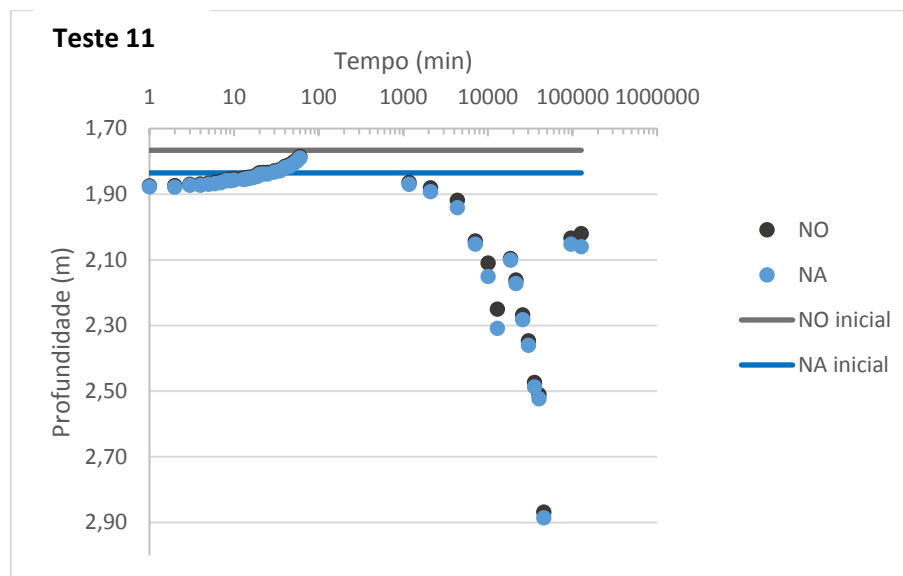
**ANEXO 6: Dados utilizados para avaliação da Tn no Teste 10 e Teste 11, e gráficos do comportamento de recuperação nos testes.**

Tabela 12: Dados utilizados para avaliação da Tn no PM 07 da Área 3

Área	03	
PM	07	
Teste	10	11
Data	12/12/2016	09/03/2017
Duração do Teste (min)	15593	127113
Interface ar/LNAPL (m)	1,848	1,766
Interface LNAPL/Água (m)	2,45	1,835
Recuperação - Fim do teste (%)	14	86
Espessura fase livre aparente (m)	0,602	0,069
Sist. Remediação Instalado	Não	Não
Sistema em operação	Não	Não
Chuvas	Sim	Não
Raio do pré filtro (m)	0,025	0,025
Raio do Poço (m)	0,058	0,058
Rendimento Específico do LNAPL Sy	0,175	0,175
Densidade Relativa do LNAPL pr	0,85	0,85
Volume de LNAPL removido do pré-filtro	2,1	0,2
Raio Efetivo (m)*	0,033	0,033
Volume inicial no pré filtro (l)*	1,22	0,14
Volume inicial no PM (l)*	0,9	0,10
J-ratio*	1,282	3,629

\*Valores obtidos através de cálculos automáticos da planilha fornecida pela API (2012).





**ANEXO 7: Dados utilizados para avaliação da Tn no Teste 12 e gráfico do comportamento de recuperação.**

Tabela 13: Dados utilizados para avaliação da Tn no PM 13 da Área 4

Área	04
PM	13
Teste	12
Data	01/07/2017
Duração do Teste (min)	54790
Interface ar/LNAPL (m)	7,039
Interface LNAPL/Água (m)	8,053
Recuperação - Fim do teste (%)	31
Espessura fase livre aparente (m)	1,014
Sist. Remediação Instalado	Sim
Sistema em operação	Não
Chuvas	Não
Raio do pré filtro (m)	0,025
Raio do Poço (m)	0,058
Rendimento Específico do LNAPL Sy	0,175
Densidade Relativa do LNAPL pr	0,81
Volume de LNAPL removido do pré-filtro	3,2
Raio Efetivo (m)*	0,031
Volume inicial no pré filtro (l)*	1,08
Volume inicial no PM (l)*	2,06
J-ratio*	80,00

\*Valores obtidos através de cálculos automáticos da planilha fornecida pela API (2012).

